



ETS INGENIEROS CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

Diseño de módulo prefabricado de uso múltiple para casos de emergencia

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Presentado por:

Serrano Richart, Luis

Para la obtención del:

Grado en Ingeniería Civil

Fecha: Valencia junio 2019

Curso: 2018/2019

Tutor: Moragues Terrades, Juan José





Agradecimientos:

A mi tutor, Juan José, por el interés y ayuda durante todos estos meses. A mis padres, Alfonsa y Luis, por su infinita paciencia y por darme la oportunidad de estudiar lo que siempre he querido. A mi hermano Rubén, por ser una fuente constante de inspiración y un modelo a seguir. A mi hermana Cristina, por soportarme siempre. A mi pareja Belén, por su apoyo y amor incondicional. Y, por último, a mis abuelos, Bernabé y Dolores, por enseñarme el valor del trabajo y de la familia.

Muchas gracias.





RESUMEN

El objetivo de este Trabajo de Final de Grado es llevar a cabo el diseño de un módulo prefabricado para emplearse en situaciones de emergencia, ya sea emergencia climática, humanitaria, etc.

Como paso previo al diseño del módulo se han estudiado los tipos de materiales más comunes para la construcción de módulos prefabricados, así como las mejores metodologías de fabricación. Una vez efectuado este estudio se ha procedido a la realización de un análisis multicriterio con el fin de determinar, mediante ponderaciones lógicas, qué material se adapta mejor a nuestras necesidades. De este análisis obtenemos que el acero es el mejor material por encima de otros como el hormigón o la madera, entre otros.

Acto seguido se escoge como elemento básico de fabricación los perfiles en L, fabricados en acero laminado en frío galvanizado. Posteriormente se realizan 3 diseños diferentes empleando la unión sucesiva de estos perfiles para crear diferentes alternativas constructivas frente al mismo problema, demostrando que nuestro módulo es competente para varios casos. Por otro lado se diseñan y calculan las uniones en seco de nuestros perfiles.

Como parte final del trabajo se han determinado los detalles constructivos de cerramientos, suelos, cubiertas, etc, así como la mejor metodología de transporte y su evaluación económica unitaria y total.

Con todo esto se ha pretendido demostrar todos los conocimientos y cualidades adquiridas por el alumno durante el estudio del grado en Ingeniería Civil, siendo esta una primera toma de contacto con el diseño, cálculo estructural y valoración de una estructura de acero.

Palabras clave: Módulo, acero laminado en frío , emergencia, diseño, prefabricado.



RESUM

L'objectiu d'aquest Treball de Fi de Grau es portar a terme el disseny d'un mòdul prefabricat per a utilitzar-se en situacions d'emergència, ja siga una emergència climàtica, humanitària, etc.

Com a pas previ al disseny del mòdul s'han estudiat els tipus de materials més comuns per a la construcció de mòduls prefabricats, així com les millors metodologies de fabricació. Una vegada efectuat aquest estudi s'ha procedit a la realització d'una anàlisi multicriteri a fi de determinar, per mitjà de ponderacions lògiques, quin material s'adapta millor a les nostres necessitats. D'aquest anàlisi obtenim que l'acer és el millor material per damunt d'altres com el formigó o la fusta, entre altres.

Tot seguit es tria com a element bàsic de fabricació els perfils en L, fabricats en acer laminat en fred galvanitzat. Posteriorment es realitzen 3 dissenys diferents emprant la unió successiva d'estos perfils per a crear diferents alternatives constructives enfront del mateix problema, demostrant que el nostre mòdul és competent per a diversos casos. Per un altre costat es dissenyen i calculen les unions en sec dels nostres perfils.

Com a part final del treball s'han determinat els detalls constructius de tancaments, sòls, cobertes, etc, així com la millor metodologia de transport i la seua avaluació econòmica unitària i total.

Amb tot açò s'ha pretés demostrar tots els coneixements i qualitats adquirides per l'alumne durant l'estudi del grau en Enginyeria Civil, sent esta una primera presa de contacte amb el disseny, càlcul estructural i valoració d'una estructura d'acer.

Paraules clau: Mòdul, acer laminat en fred , emergència, disseny, prefabricat.



ASBTRACT

The aim of this end-of-degree work is to carry out the design of a prefabricated module for use in emergencies, whether it is a climatic, humanitarian, etc.

As a step prior to the design of the module, the most common types of materials were studied for the construction of prefabricated modules, as well as the best manufacturing methodologies. Once this study has been carried out a multicriteric analysis in order to determine, by means of logical weights, which material is best suited to our needs. From this analysis we obtain that steel is the best material above others like concrete or wood, among others.

Next, the L-profiles, made of cold formed galvanized steel, are chosen as the basic manufacturing element. Subsequently, 3 different designs are made using the successive joining of these profiles to create different constructive alternatives against the same problem, proving that our module is competent for several cases. On the other hand, the dry joints of our profiles are designed and calculated.

As a final part of the work, the constructive details of enclosures, soils, roofs, etc., as well as the best transport methodology and its unitary and total economic evaluation have been determined.

With all this has been tried to demonstrate all the knowledge and qualities acquired by the student during the accomplishment of the degree in Civil Engineering, being this a first contact with the design, structural calculation and valuation of a steel structure.

Key words: Module, cold formed steel, emergency, design, prefabricated.





INDICE GENERAL DEL PROYECTO

- DOCUMENTO Nº1: Memoria General

ANEJOS A LA MEMORIA

ANEJO Nº1: Dimensiones y características del módulo prefabricado

ANEJO Nº2: Cálculo estructural

ANEJO Nº3: Diseño de Uniones

ANEJO Nº4: Diseño final

ANEJO Nº5: Logística y transporte

ANEJO Nº6: Valoración económica

- DOCUMENTO Nº2: Planos

Plano Nº1: Vistas diseño 1

Plano Nº2: Vistas diseño 2

Plano Nº3: Vistas diseño 3

Plano Nº4: Vigas y detalle

Plano Nº5: Detalle unión





ÍNDICE

Contenido

1.Introducción:.....	15
2.Objetivo y alcance del trabajo de fin de grado:	15
3.Problématica:	16
4.Análisis de los sistemas modulares:.....	16
4.1Sistemas modulares:	17
4.2 Reutilización de contenedores del transporte marítimo:.....	34
4.3 Aplicaciones y ejemplos reales:.....	36
5.Estudio de alternativas:.....	43
5.1 Definición de las alternativas:	43
5.2 Definición de las características determinantes:	48
5.3 Análisis multicriterio:	50
5.4Definición del sistema modular definitivo:.....	53
6.Dimensiones y características de los módulos prefabricados:	53
6.1.Dimensiones:.....	53
6.2.Características:	54
7.Análisis estructural:.....	55
8. Diseño de uniones:.....	57
9.Diseño final:	58
10.Logística y modo de transporte:	59
11.Valoración económica:.....	60
12. Conclusiones:	60
13. Bibliografía:	61
Normativas:.....	61
Páginas web.....	61
14. Anejos.....	62





ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 : Comparación de plazos en construcción</i>	17
<i>Ilustración 2 : Esquema general de montaje (Sistema Cuatro50)</i>	19
<i>Ilustración 3: Acabados exteriores de madera (Sistema Cuatro50)</i>	20
<i>Ilustración 4: Módulo siendo transportado (MODULTEC)</i>	20
<i>Ilustración 5: Dimensiones módulos ALCO</i>	21
<i>Ilustración 6: Componentes módulos ALCO</i>	22
<i>Ilustración 7: Acabados en pizarra (Modular Projects)</i>	24
<i>Ilustración 8 Estructura de madera (Modular Projects)</i>	24
<i>Ilustración 9: Módulos de casas pasivas (ABS)</i>	25
<i>Ilustración 10: Gel-Coat en la fachada del Museo Reina Sofia de Madrid</i>	26
<i>Ilustración 11: Comparación viga de hormigón armado con viga de hormigón y fibra de carbono.</i>	26
<i>Ilustración 12: Componentes paneles Baukit</i>	27
<i>Ilustración 13: Transporte paneles Baukit</i>	28
<i>Ilustración 14: Esquema modular (Sistema OBOX)</i>	30
<i>Ilustración 15: Módulo completo con escalera (Sistema OBOX)</i>	30
<i>Ilustración 16: Instalación módulos COMPACTHABIT</i>	31
<i>Ilustración 17: Instalación módulos BSCP</i>	32
<i>Ilustración 18: Instalación módulos BSCP</i>	32
<i>Ilustración 19:: Ejemplo de vivienda de alta gama construida con materiales compuestos de acero y hormigón (Hormipresa)</i>	33
<i>Ilustración 20: Contenedores siendo izados (Container city)</i>	36
<i>Ilustración 21: Casa R128 de Werner Sobek.</i>	37
<i>Ilustración 22: Casa R128 de Werner Sobek</i>	37
<i>Ilustración 23: Casa R128 de Werner Sobek</i>	38
<i>Ilustración 24: Módulos SpaceX, residencia universitaria en Utrecht, Holanda.</i>	38
<i>Ilustración 25: La Arena del Futuro (Rio de Janeiro).</i>	39
<i>Ilustración 26: Casa R128 de Werner Sobek</i>	40
<i>Ilustración 27: Casa R128 de Werner Sobek</i>	40
<i>Ilustración 28: Aulas del "Tower Hamlets College"</i>	41
<i>Ilustración 29: Edificio de 100 m en Bombay.</i>	41
<i>Ilustración 30: Diseño concurso Nueva York 2013</i>	42
<i>Ilustración 31: Ejemplo montaje panel Cuatro50</i>	44
<i>Ilustración 32: Sistema desmontable BAUKIT</i>	45
<i>Ilustración 33: Diseño 1</i>	55
<i>Ilustración 34: Diseño 2</i>	56
<i>Ilustración 35: Diseño 3</i>	56
<i>Ilustración 36: Nudo y viga estudiados</i>	57
<i>Ilustración 37: Vista detalles módulo</i>	58
<i>Ilustración 38: Propuesta de acabados interiores</i>	59





1.Introducción:

El presente trabajo se redacta con el fin de elaborar el diseño de un módulo prefabricado de uso múltiple para su utilización en casos de emergencia humanitaria o ambiental. Como bien se indica, se busca obtener el mejor diseño atendiendo a diferentes factores y, en consecuencia, diseñar dicho módulo para cumplir con su función.

2.Objetivo y alcance del trabajo de fin de grado:

En el presente documento, sus anejos y el resto de documentos que conforman el proyecto, se desarrolla el Trabajo de Final de Grado del alumno Luis Serrano Richart. En dicho trabajo se pretende emplear los conocimientos adquiridos a lo largo del estudio del Grado en Ingeniería Civil. Este constituye un primer contacto con el estudio, diseño y cálculo de un módulo prefabricado, teniendo siempre en cuenta dimensiones, características y situaciones reales. Los tres principales puntos que se pretenden desarrollar en el citado trabajo contemplan la ejecución de tareas habituales de la Ingeniería Civil de diferentes ramas y tipologías.

A tenor de esto se puede observar que el alcance puede dividirse en tres bloques principales:

1. Definición de los materiales, tipología y características principales del módulo. Debiendo de escoger entre varias alternativas viables como: uso de contenedores de mercancías, módulos prefabricados de hormigón, módulos prefabricados de acero, módulos prefabricados de madera y módulos fabricados con materiales compuestos.
2. Dimensionamiento y cálculo estructural de la solución escogida. Una vez determinada la mejor alternativa se procederá al cálculo estructural de la misma, atendiendo a criterios como la economía y el transporte, entre otros. Todo ello de acuerdo al CTE en sus diferentes documentos básicos.
3. Valoración económica de la alternativa final y estudio del transporte de la misma.

Es por todo esto que el objetivo principal de este TFG es el de realizar un estudio de las características necesarias en un módulo prefabricado para emplearlo en situaciones de emergencia, atendiendo no solo al criterio estructural si no a otros como la facilidad e transporte, de montaje o el criterio económico.

Para poder alcanzar este objetivo principal se establecen una serie de objetivos secundarios como son:

- Descripción de los sistemas modulares existentes y sus principales fabricas españolas.
- Análisis de sistemas modulares ya realizados.
- Análisis de la problemática a resolver.
- Identificar y medir unidades de obra determinantes para el estudio de soluciones.
- Elaborar los planos tanto del diseño estructural como de las uniones.
- Determinar la mejor metodología de transporte de los módulos y su correspondiente coste.



3.Problématica:

En la actualidad, la reubicación de personas desplazadas por conflictos bélicos o por catástrofes naturales se ha convertido en un problema de gran calado. Cuando un incidente como los anteriores se produce, se genera una necesidad inmediata de alojamiento para todas esas personas afectadas, necesidad que ha de verse cubierta lo más rápido y con las mejores prestaciones posibles.

Hemos sido testigo de cómo, frente a un problema humanitario como una guerra o un tsunami, miles de personas han de vivir en campamentos durante meses, a merced de las inclemencias del tiempo y sin un lugar donde poder alojarse hasta que todo vuelva a la normalidad.

De esta necesidad nació la idea de diseñar un módulo prefabricado ligero, sencillo, con un correcto aislamiento y fácilmente transportable y desplegable en la zona afectada, con el fin de poder generar zonas habitables de manera rápida y eficiente, de forma que, mediante el despliegue de cuantos módulos fuera necesario, se consiga alojar a grandes cantidades de personas con unos servicios y unas calidades mucho mejores a las que se encuentran actualmente en los campamentos de refugiados o afectados por este tipo de eventos.

Es por esto que, en el presente trabajo, diseñaremos un módulo prefabricado para utilizarse en estos casos de emergencia, con el fin de generar estructuras completamente funcionales y durables en el tiempo de forma rápida y eficiente, con la intención de alojar a dichas personas durante semanas o meses, pudiendo desmontar y retirar dichas estructuras llegado el momento y, mediante un proceso de rehabilitación, poder volver a utilizar dichos módulos en otras situaciones de emergencia posteriores.

4.Análisis de los sistemas modulares:

Antes de definir nuestro módulo prefabricado, hemos de conocer qué es la construcción modular, los principales sistemas modulares que hay en la actualidad, sus características y materiales y las principales empresas españolas dedicadas a su fabricación.

La construcción modular se basa en el diseño y fabricación de elementos lineales, en 2D o 3D, capaces de, mediante su unión sucesiva, formar una estructura autoportante, resistente y plenamente funcional. Estos elementos están diseñados y fabricados en taller, empleando maquinaria específica, consiguiendo así que la utilización de los materiales de fabricación se aprovechen al 100%, se obtengan las características resistentes deseadas y se minimicen los tiempos de construcción. Todo esto, junto con la fiabilidad que proporciona el trabajo en taller, se traduce en una disminución, de hasta tres veces, de los plazos de ejecución y una reducción de los costes de la obra a ejecutar.



Plazos en la construcción tradicional:

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Diseño	█	█	█	█	█														
Análisis presupuestario					█	█													
Fábrica																			
Obra							█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Plazos de la construcción Pre-Industrializada:

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Diseño	█	█	█	█	█														
Análisis presupuestario			█	█	█														
Fábrica				█	█	█													
Obra							█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Plazos de la construcción industrializada:

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Diseño	█	█	█																
Análisis presupuestario			█	█															
Fábrica				█	█	█													
Obra					█	█													

Ilustración 1 : Comparación de plazos en construcción

Una de las principales ventajas de la construcción modular reside en la facilidad de montaje y la posibilidad de desmontar dichos módulos. Gracias a esta metodología, las estructuras se pueden diseñar para que, una vez cumplida su función, puedan ser desmontadas, trasladadas y vueltas a montar en otro emplazamiento para continuar con su función , o bien, realizar una totalmente diferente, como explicaremos en el apartado 4.3 Aplicaciones y ejemplos reales.

La fabricación de módulos prefabricados se divide principalmente en dos tipos: sistemas modulares y contenedores del transporte marítimo, subdividiendo los sistemas modulares en 3 categorías: sistemas modulares ligeros, sistemas modulares pesados y sistemas modulares compuestos.

4.1Sistemas modulares:

Sistemas modulares ligeros:

- Acero:

Cuando pensamos en un material resistente y ligero, automáticamente nos viene a la mente el acero, un material con el cual podemos conseguir perfiles que se ajusten perfectamente a las medidas que necesitamos aportándonos unas resistencias y cualidades óptimas.



Pese a que el acero posee una densidad mucho mayor que el hormigón, gracias a sus cualidades podemos conformar perfiles muy esbeltos, lo que nos reduce la sección de nuestra pieza. Es por esto que para un mismo estado de carga podemos conseguir soluciones más ligeras empleando el acero que el hormigón.

Por otro lado, una de las características más interesantes del acero dentro de la construcción modular es la facilidad para realizar uniones entre perfiles. Estas uniones pueden hacerse en seco (mediante tornillos) o mediante soldadura. Dado que para nuestro tipo de módulo nos interesa que sea desmontable y, por otro lado, en la zona objetivo es posible que no tengamos los medios suficientes para realizar soldaduras de calidad, debemos optar por una unión en seco, de forma que podamos montar rápidamente los módulos y de igual manera, desmontarlos una vez termine su tiempo de despliegue en la zona en cuestión.

Podemos decir que, de forma amplia, las principales características del acero son:

- Densidad media de 7850 kg/m^3
- Resistencia a tracción: $500\text{-}600 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a compresión: $500\text{-}600 \text{ N/mm}^2$
- Posibilidad de unión mediante soldadura o atornillado
- Piezas muy esbeltas
- Facilidad de transporte
- Ligereza
- Coste de fabricación relativamente alto.
- Capacidad de adaptación gracias a las aleaciones

El acero, como bien hemos comentado, nos permite realizar un sin fin de perfiles, adaptándose a nuestras necesidades. Podemos conseguir que nuestro acero obtenga diferentes cualidades gracias a las diferentes aleaciones con otros materiales, lo que nos permite diseñar un acero óptimo para nuestro diseño.

Los sistemas modulares fabricados en acero pueden ser de dos tipos, fabricados como un único módulo el cual se transporta íntegro a la zona en cuestión o bien se fabrican los elementos por separado, diseñando las uniones de forma que dichas piezas puedan ser unidas in situ en el lugar de destino.

El primero de los casos nos ofrece un módulo totalmente acabado, listo para situar en el lugar de destino, reduciendo el tiempo de despliegue. En ocasiones, los medios disponibles en la zona de emplazamiento de los módulos son reducidos, teniendo que optar por módulos lo más terminados posibles. Este tipo de soluciones nos ofrecen espacios habitables totalmente terminados, disponiendo de todos los servicios previamente instalados y listo para habitar.

Como principal inconveniente tenemos el tamaño limitado de los módulos, puesto que, al estar diseñados como un único bloque no podemos fabricar elementos excesivamente grandes o complejos, ya que han de ser transportados como "todo uno" y dificultaría mucho su movilidad.



Pese a que este tipo de sistemas son muy utilizados para casos donde las estructuras han de montarse y desmontarse , también se emplean en estructuras fijas como veremos en el apartado de ejemplos.

En el mercado Español existen varias empresas especializadas en la fabricación de módulos prefabricados de acero, ya sea en elementos individuales posteriormente unidos o módulos tridimensionales completos. Como ejemplos más descriptivos de empresas fabricantes y sus diseños tenemos:

– Sistema Cuatro50:

El sistema Cuatro50 está desarrollado por el estudio de arquitectura Nuñez&Ribot y la constructora Ditecvi, ambas empresas localizadas en Madrid. Esta colaboración nace de la necesidad de cubrir un vacío en el sector de la construcción en España, por lo que se dieron cuenta de que mediante el uso de la construcción industrializada y del montaje modular se podía optimizar los tiempos y precios de las construcciones.

Este sistema se basa en el diseño de estructuras de acero totalmente personalizables mediante el uso de módulos de 4,5x4,5 m, obteniendo estructuras tridimensionales de acero galvanizado. Dicho sistema permite al cliente la elección y diseño completo, junto con los acabados, integrando todas las instalaciones necesarias y presentando una alta eficiencia energética.

Puesto que este sistema se fabrica con diferentes paneles, solo se necesita el uso de una grúa sencilla para la movilización de los paneles, ya que pesan como máximo 60 kg. Gracias al diseño previo y a la planificación total del proceso diseño-fabricación-construcción, permite la reducción de plazos.



Ilustración 2 : Esquema general de montaje (Sistema Cuatro50)



Ilustración 3: Acabados exteriores de madera (Sistema Cuatro50)

– Modultec S.L:

La empresa Modultec S.L, situada en Gijón, es especialista en el diseño y fabricación de módulos tridimensionales de acero. Como hemos comentado anteriormente, este tipo de sistemas permite fabricar módulos totalmente completos listos para su colocación.

El sistema constructivo MODULTEC permite la construcción, deconstrucción y reubicación de los edificios al completo, estando diseñados con precisión y obteniendo rendimientos acústicos y térmicos muy elevados. Por otro lado nos permite escoger la calidad de los materiales empleados con el fin de adaptarse a la economía de cada cliente.

Dicho sistema modular dispone, debido a su diseño como bloque completo, de unas medidas estándar las cuales han de coincidir con las dimensiones de los medios de transportes convencionales como son los camiones o los barcos.



Ilustración 4: Módulo siendo transportado (MODULTEC)

– ALCO:

El grupo ALCO ha diseñado un módulo prefabricado de acero a partir de largueros UPN-140, sobre los cuales se montan pilares de chapa de 3mm de espesor. Este módulo permite adosarse en cualquiera de sus caras y apilarse hasta 3 pisos de altura, lo que nos confiere una gran versatilidad.

Desde la empresa nos ofrecen una gran cantidad de acabados y aspectos personalizables para nuestro módulo, así como varios tipos de modelos, adaptándose a las necesidades de cada cliente en función del uso que se le dará al módulo.

Puesto que el 90% del módulo se fabrica y ensambla en taller conseguimos una reducción de plazos y coste de la obra, por otro lado, la empresa se compromete con el transporte e instalación del módulo. Dado que este tipo de módulos prefabricados son un "todo uno", las cargas que transmiten al terreno se reparten por toda la base de este, por lo que con una cimentación muy ligera o directamente con una correcta compactación del terreno lograremos una superficie competente para nuestro módulo de hasta 3 pisos, dependiendo obviamente de las cualidades del terreno.

Como se puede apreciar en la ilustración 5, las dimensiones varían desde los 2,360 m de largo hasta los 8,340, manteniendo unas dimensiones de anchura y de altura en todos los modelos, también podemos observar que los pesos oscilan desde los 550 kg del modelo A-205 hasta los 2680 del modelo A-820. En la ilustración 6 se puede ver un desglose completo de los componentes de cada elemento del módulo.

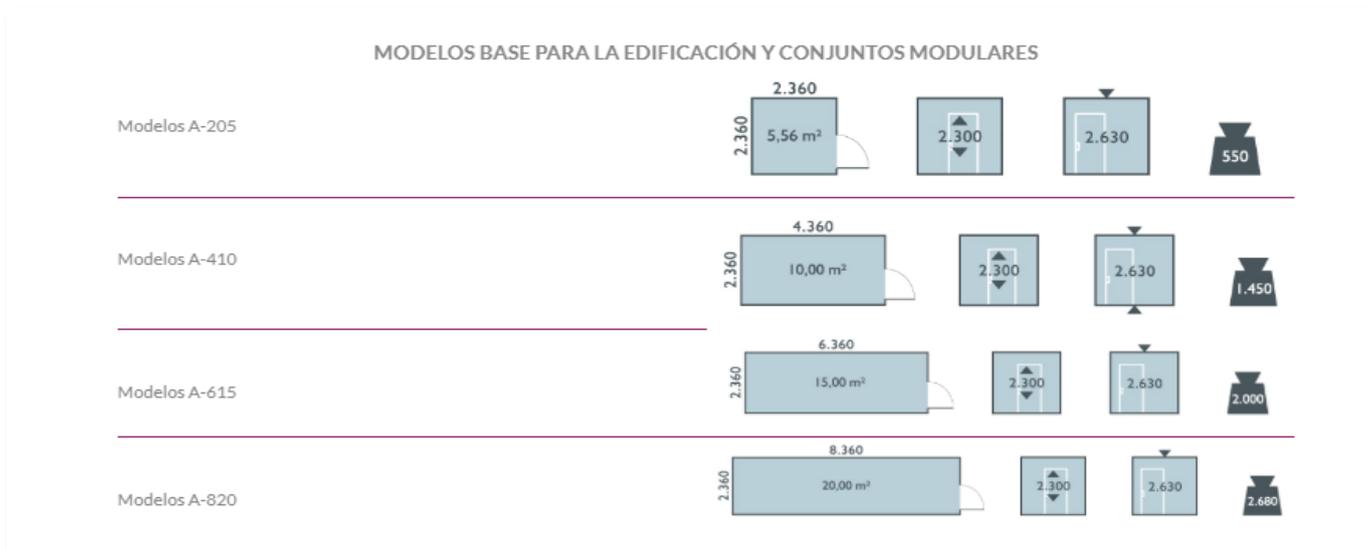


Ilustración 5: Dimensiones módulos ALCO

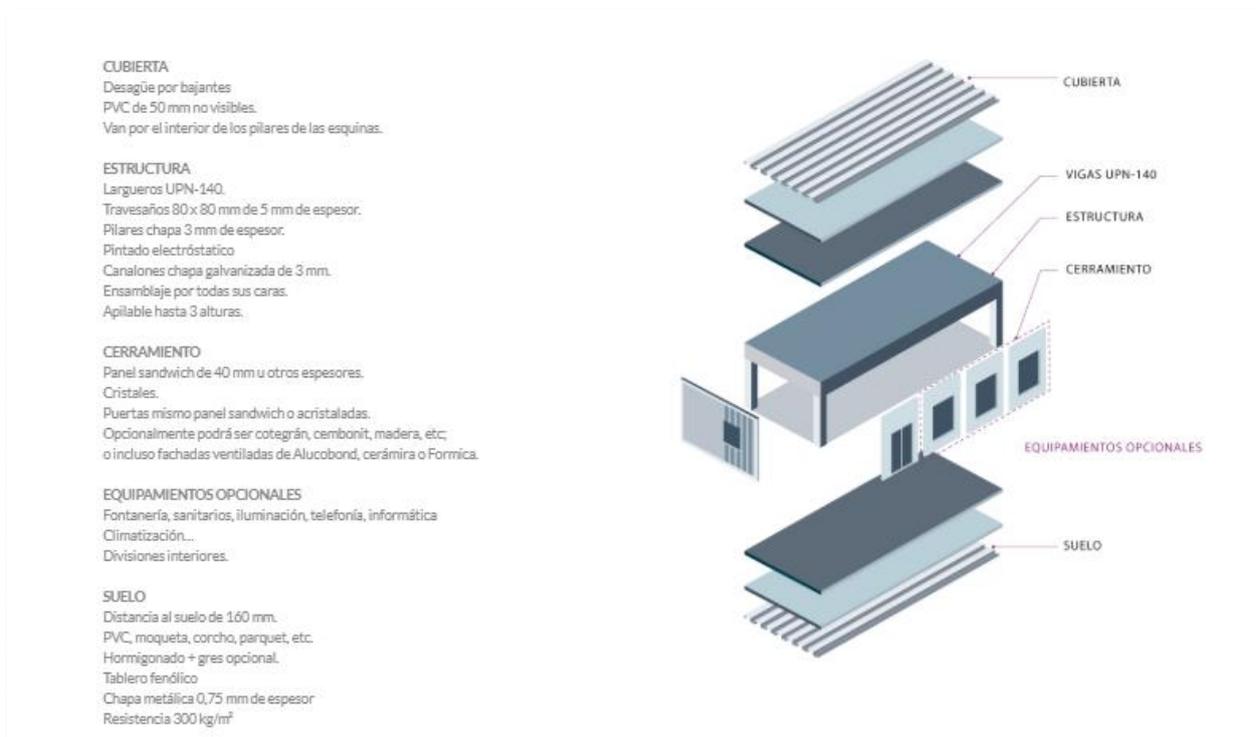


Ilustración 6: Componentes módulos ALCO

- **Madera:**

Desde los inicios de la construcción, la madera se ha utilizado como elemento constructivo en obras civiles o de edificación. Se ha demostrado que el uso de la madera como elemento estructural es perfectamente competente pese a algunos problemas como son la poca tolerancia a la humedad o la necesidad de fabricar secciones de mayor tamaño para conseguir resistencias similares a las de otros materiales.

En la actualidad la madera se emplea principalmente en revestimientos, solados o decoración final de las edificaciones ya que nos ofrece unos acabados muy agradables así como un mayor confort acústico e higrotérmico.

Este tipo de materiales es muy utilizado en zonas de EE.UU y el norte de Europa. Nos ofrece grandes cualidades en materia de confort pero, como se puede comprobar cada año en la época de tornados en EE.UU o sometido a las inclemencias del tiempo, este material no nos aporta una resistencia adecuada frente fuertes vientos, lluvias o terremotos, generando grandes daños en la estructura.

Dependiendo del tipo de madera utilizada obtendremos unas cualidades u otras. Pese a esto, las principales características de la madera son:



- Resistencia a compresión paralela a la fibra: 16-23 N/mm²
- Resistencia a compresión perpendicular a la fibra: 4.3-5.7 N/mm²
- Resistencia a tracción paralela a la fibra: 8-18 N/mm²
- Resistencia a tracción perpendicular a la fibra: 0.3-0.4 N/mm²
- Alto confort acústico e higrotérmico
- Alta resistencia al fuego
- Flexibilidad de diseños
- Problemas con la humedad
- Facilidad de transporte
- Ligereza

La madera es un material que proporciona características muy interesantes y sobre todo, aporta una componente estética que, en muchos casos, supera a cualquier otro material. La elección de los sistemas modulares fabricados en madera frente a cualquier otro tipo viene dado por 3 claves principales: sostenibilidad, acabados y confort.

Como bien sabemos, la madera es un recurso renovable, lo que nos permite poder fabricar módulos sin perjudicar al medio ambiente. Este factor ha llevado a muchos diseñadores a desarrollar sistemas modulares íntegramente en madera, de forma que podamos fabricar núcleos poblacionales con el menor impacto ambiental posible. Por otro lado, la madera tiene un alto valor estético, lo que permite adaptarnos a muchos ambientes minimizando el impacto visual.

En contraposición, los sistemas modulares fabricados con madera presentan varios inconvenientes como son la baja durabilidad de las construcciones respecto a otras soluciones, baja respuesta frente acciones climatológicas y la necesidad de grandes secciones para obtener resistencias adecuadas.

Dentro del mercado español de sistemas modulares de fabricados en madera existen varias empresas que ponen a nuestra disposición diseños muy interesantes como son:

- Modular Projects:

Esta empresa alicantina lleva dentro del mercado modular desde 2009, cuando lanzo su primer módulo prefabricado de madera, inspirándose en la construcción habitual de EE.UU y muchos países del norte de Europa.

Esta empresa apuesta por la utilización de la madera como elemento de construcción, consiguiendo edificaciones con una construcción rápida y sencilla, lo que abarata los costes de forma notable. Por otro lado, la elección de la madera no tiene solo una componente económica, si no que viene dada por la ecología, flexibilidad y funcionalidad de dicho material.

Como punto fuerte de este sistema en particular tenemos la rapidez del proceso diseño-construcción, en tan solo 90 días desde la concesión de la licencia se comprometen a entregar la vivienda completamente acabada, algo muy a tener en cuenta.

Como punto negativo, dado que nuestro diseño ha de ser desmontable, este tipo de sistema modular no encajaría con nuestras necesidades puesto que, una vez construido, no puede ser desmontado y trasladado.



Ilustración 8 Estructura de madera (Modular Projects)



Ilustración 7: Acabados en pizarra (Modular Projects)

Como se puede apreciar en las Ilustraciones 7 y 8, este tipo de construcciones se basan en la unión de paneles de madera formando módulos tridimensionales generando la estructura, procediendo posteriormente con revestimiento el cual, en este caso, es de pizarra, aportándonos una componente estética muy alta.

- American Building Systems :

Otra de las empresas especialistas en este tipo de sistemas modulares es AMS. Esta empresa ha diseñado unos modelos llamados "casas pasivas", los cuales ofrecen un consumo energético muy bajo, aportando una temperatura ambiente confortable sin necesidad de calefacción convencional.



Según sus propios estudios, estas construcciones pueden consumir menos de 15 kWh por m² y año frente a los 100kWh por m² y año de las viviendas convencionales, llegando a ahorrar un 90% de energía.

Este tipo de sistema se basa en 5 principios básicos como son: un aislamiento adecuado, cero fugas de aire, eliminación de puentes térmicos, ventanas de altas prestaciones con orientación adecuada y sistemas de ventilación controlada.

Gracias a estos principios consiguen una reducción más que notable del consumo energético, todo ello afectando al precio final de la vivienda, ya que este tipo de aislamientos y técnicas suelen encarecer el precio final.



Ilustración 9: Módulos de casas pasivas (ABS)

- **Materiales compuestos:**

El material compuesto se basa en la unión de una matriz (polímero) con un refuerzo (fibras). La función de la fibra es la de hacer de elemento resistente dotando de rigidez y resistencia al material, principalmente a tracción, mientras que la matriz actúa como elemento resistente a compresión y cizalla, dando forma a la pieza y protegiendo frente agente externos como la humedad, UV, etc.

Los refuerzos de fibras o cargas nos permiten dotar a los polímeros de altas rigideces consiguiendo ductilidades reducidas, mejores resistencias dinámicas y mejor fluencia que los metales.



Los elementos que componen los materiales compuestos son: matriz (resinas, poliéster, viniléster, epoxi) o bioresinas, refuerzo (fibras de vidrio, fibra de carbono, aramida, fibras naturales), aditivos y recubrimientos, siendo las principales fibras empleadas en los materiales compuestos la fibra de vidrio y la fibra de carbono.

En la construcción podemos encontrar los materiales compuestos en muchos elementos diferentes como pueden ser las fachadas, con acabado como el GEL-COAT, aportando alta protección UV. También podemos encontrar perfiles pultruidos, empelados principalmente en zonas con ambientes muy agresivos. Estos perfiles, al igual que los perfiles de acero pueden unirse mediante tornillos o bien podemos emplear adhesivos.

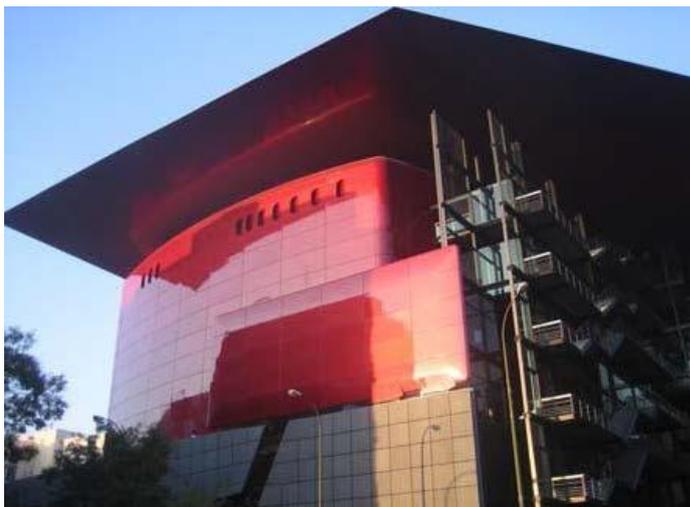


Ilustración 10: Gel-Coat en la fachada del Museo Reina Sofia de Madrid

Por otro lado tenemos la utilización de estos materiales en la fabricación de casas prefabricadas, en las cuales se utilizan paneles sándwich de materiales compuestos por su durabilidad, aislamiento térmico y acústico y su gran ligereza. Como se puede observar en la Ilustración 11, gracias a empleo de estos materiales conseguimos perfiles mucho más reducidos y ligeros, tanto estructuralmente como en cuestión de acabados.



Ilustración 11: Comparación viga de hormigón armado con viga de hormigón y fibra de carbono.



Como hemos comentado anteriormente, el uso de materiales compuesto presenta ventajas como son la ligereza, resistencia a ambientes agresivos, alta resistencia, reducción de perfiles y volúmenes, entre muchas otras. Pero también presenta desventajas como pueden ser su alto coste de fabricación o la escasa flexibilidad in situ de la estructura, dado que en caso de necesidad de modificación de la estructura en cuestión, no se puede proceder al corte de las piezas o unión simple de ellas.

De igual forma que con los sistemas modulares de madera, dentro de los fabricantes de sistemas modulares con materiales compuestos encontramos a ABS, empresa que utiliza el sistema Baukit para la construcción de viviendas en entornos hostiles ya sea por clima, accesibilidad o sismos.

El sistema Baukit de ABS se trata de un sistema constructivo a base de paneles estructurales compuestos que se ensamblan con adhesivos.

Sus paneles están sellados al vacío, formado internamente por una estructura de elementos lineales, rigidizadores y aislante de poliisocianurato (PIR), estando revestido de fibra de yute y resinas con acabado impermeable.

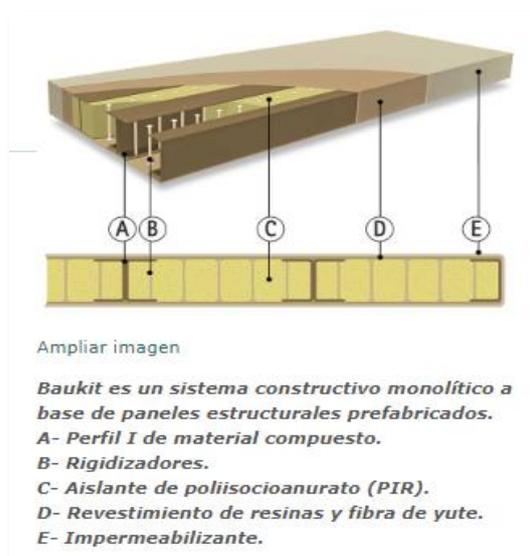


Ilustración 12: Componentes paneles Baukit

Como punto fuerte de este sistema modular encontramos su peso extremadamente reducido (9kg/m^2) y su resistencia a la humedad y a los xilófagos y presenta una resistencia al fuego de 24 minutos que pueden aumentar a 43 minutos si añadimos los trasdosados de cartón-yeso. Las dimensiones máximas de dichos módulos son de 2x5 metros, facilitando el transporte, con espesores de entre 51mm en tabiquerías interiores hasta los 153 mm en forjados con gran sobrecarga.

La componente más interesante de este diseño reside en su transporte ya que los propios paneles pueden formar el contenedor de transporte, evitando el alquiler de este y el coste de transporte de retorno, lo que se traduce en una reducción considerable del coste total del módulo.



Ilustración 13: Transporte paneles Baukit

Finalmente, la empresa confirma que solo 4 operarios y un solo día de trabajo bastan para realizar el montaje de una vivienda de unos 30m², además de incluir en el suministro de la vivienda un manual de montaje y los útiles necesarios para simplificar el proceso constructivo.

Sistemas modulares pesados:

Los sistemas modulares pesados están fabricados en hormigón realizándose íntegramente en fábrica, yendo desde elementos lineales hasta módulos completos en 3D.

Dado que se emplea hormigón para su fabricación podemos obtener diferentes características, ya que estas variarán dependiendo del tipo de hormigón utilizado. Pese a esto, los sistemas modulares pesados cuentan con unas características comunes como son la estabilidad y rigidez, una gran durabilidad y las buenas condiciones de confort (acústico e higrotérmico).

A la hora de escoger este tipo de soluciones hemos de valorar varios factores como son, el peso de los módulos, la dificultad de transporte y montaje, la necesidad de maquinaria pesada para su correcto manejo en obra, el uso de vehículos especiales para su transporte, etc. Todos estos pros y contras se verán más en detalle en apartados posteriores, con el fin de determinar qué tipo de sistema modular es el más indicado para nuestro caso, así como el material que emplearemos para su diseño.

Si analizamos las grandes obras de ingeniería realizadas mediante prefabricados nos damos cuenta de que este tipo de material se utiliza principalmente en obras con una vida útil prevista de décadas. Dependiendo del tipo de hormigón conseguiremos unas características u otras, pero a modo de visión general para un predimensionamiento podemos decir que sus características más representativas son:



- Densidad entre 2000 y 2800 kg/m³
- Resistencia a compresión: 20-50 MPa
- Resistencia a tracción: 2-5 Mpa
- Gran impermeabilidad
- Grandes volúmenes y dimensiones
- Alta durabilidad
- Dificultad de transporte y almacenaje
- Bajo coste de fabricación
- Gran peso y necesidad de cimentaciones.
- Dificultad de unión entre módulos.

La construcción tradicional ha utilizado mayoritariamente hormigón para sus estructuras, por lo que el usuario medio está más familiarizado con este material. Es por esto que, a la hora de decidirse por la construcción modular para la edificación de su vivienda, el usuario estándar opta por este tipo de soluciones frente a otras como el acero o madera. En muchas ocasiones, la decisión de emplear hormigón para una determinada construcción no viene dada tanto por la idoneidad de las características del material si no por la visión de seguridad y calidad que les proporciona el hormigón, factor interiorizado por el uso de dicho material a lo largo de la historia.

Este tipo de sistemas modulares se emplean usualmente en la construcción de viviendas, naves industriales, obras de fábrica, etc, aunque, como veremos en apartados posteriores, el uso de módulos prefabricados de hormigón se ha extendido cada vez más en la construcción de grandes obras como estadios olímpicos o estaciones de transporte público, entre otras.

En la actualidad existen numerosas empresas punteras en el sector de los sistemas modulares pesados, muy especializadas en este tipo de materiales, obteniendo calidades y prestaciones muy buenas. Cada gran empresa suele optar por patentar sus propios módulos, por lo que, dentro del mercado actual, podemos encontrar múltiples soluciones diferentes para cada caso.

Al igual que con los sistemas modulares ligeros, podemos encontrar dos tipos de diseños modulares, los fabricados por paneles y unidos in situ en la zona objetivo del módulo o bien los módulos tridimensionales fabricados íntegramente en taller y transportados como un "todo uno". Para cada uno de estos tipos existen varias empresas fabricantes como son:

- Obox housing:

La empresa madrileña Obox Housing está especializada en la fabricación de módulos tridimensionales de hormigón armado con dimensiones de 6x3 metros en planta, con un techo abovedado que le confiere una geometría característica, cubriendo todas las partes del proceso constructivo desde su diseño hasta su transporte y montaje, pasando por la producción y elección de acabados.

Dado que este sistema modular entra dentro de la clasificación de pesados, nos permite diseñar una estructura que soporte condiciones críticas como huracanes o terremotos, así como ambientes agresivos. Por otro lado nos permite la construcción de estructuras escalables, pudiendo crecer en todas las direcciones, incluyendo la altura.

Este sistema modular incluye todos los servicios y características desde fábrica, siendo prácticamente habitable cuando termina su fabricación en taller, solo teniendo que transportar y situar el módulo en el lugar deseado para que, realizando algunas tareas de acabados, sea completamente habitable en cuestión de horas



Ilustración 15: Módulo completo con escalera (Sistema OBOX)



Ilustración 14: Esquema modular (Sistema OBOX)

– Compacthabit:

Al igual que el sistema Obox, la empresa barcelonesa Compacthabit ha diseñado su propio módulo tridimensional de hormigón armado, consiguiendo fabricar módulos autoportantes, individuales entre sí, con dimensiones transportables y lo más importante, desmontables y reconvertibles.

Este sistema modular se diferencia del resto debido a su planteamiento modular. Desde Compacthabit han desarrollado el sistema eMii, de forma que cada módulo sea independiente entre sí, entrando en contacto solamente mediante elementos elásticos, cortando la transmisión directa del sonido. Esta cualidad, junto con su durabilidad mejorada gracias al tipo de hormigón utilizado, nos aporta una gran resistencia frente a acciones climatológicas extremas o sismos.



Como principal peculiaridad encontramos el sistema de estructura flotante, único en el mundo. Gracias a su hormigón de alta resistencia y a su carácter auto portante se consiguen construir edificios de hasta 8 alturas sin necesidad de apoyo de ningún elemento rígido. Pese a la utilización de hormigones con 50 MPa de resistencia y aceros B500S, esta solución consigue una reducción de hasta el 30% del peso de la estructura respecto de soluciones tradicionales de hormigón y ladrillo.

Gracias a su sistema de estructura flotante, este tipo de edificaciones resisten muy bien los sismos. El sistema de estructura flotante se basa en el acopio de los módulos entre piezas metálicas insertadas en el hormigón, con elementos metálicos integrados, garantizando la transmisión de cargas horizontales, mientras que las cargas verticales se resuelven mediante uniones elásticas, distribuidas bajo los nervados del módulo.

Pero, pese a la cantidad de elementos de seguridad frente a oscilaciones o movimientos de la estructura, todas las uniones son realizadas en seco, permitiendo un montaje y desmontaje fácil y rápido.



Ilustración 16: Instalación módulos COMPACTHABIT

- BSCP (Building System with Concrete Panel)

BSCP es la empresa española diseñadora del primer sistema integral para la construcción mediante el uso de piezas de hormigón armado con las cuales se construye total o parcialmente cualquier edificio independientemente de su forma, uso o dimensión.

Este sistema de construcción industrializada se basa en la "construcción virtual", con la que se diseña previamente el edificio de forma que consigamos saber con exactitud cuántas piezas y de qué tamaños y formas deben ser para así poder realizar una cadena de montaje. Mediante este sistema establecemos el ritmo de instalación de las piezas, pudiendo determinar con el tiempo de montaje.



Los beneficios que conseguimos mediante el uso de este sistema constructivo con: ejecutar sin improvisación, programación diaria, no necesidad de mano de obra excesivamente especializada, eliminación de partidas innecesarias y cumplimiento estricto de la normativa de cada país.



Ilustración 17: Instalación módulos BSCP



Ilustración 18: Instalación módulos BSCP

– Sistemas modulares compuestos:

En muchas ocasiones la construcción de una estructura no puede realizarse íntegramente con un único material, por lo que se recurre a los sistemas modulares compuestos. Estos sistemas están formados por partes de diferentes materiales, empleando sistemas ligeros o pesados conforme sea necesario.



Gracias a la utilización conjunta de materiales ligeros y pesados podemos obtener módulos o sistemas modulares con características de ambos tipos de sistemas. Es por esto que podemos conseguir elementos pesados y resistentes(hormigón) con gran confort y calidad en los acabados (madera) o bien elementos ligeros (acero) con partes singulares o llamativas (plásticos).

Dado que los diferentes tipos de materiales se combinan entre sí, no se puede concluir una lista de características, por lo que esto último depende de la combinación de estos materiales y sus proporciones. Este tipo de sistemas modulares puede emplearse para infinidad de estructuras, pero se emplean principalmente en la construcción de viviendas, por su capacidad de personalización y la posibilidad de ajustarse a las exigencias del cliente .

Cabe destacar que estos sistemas modulares son empleados por empresas de construcción de viviendas de alta gama, ofreciendo materiales, calidades y acabados de alto nivel.

Una de las principales empresas españolas especializadas en la construcción de viviendas mediante el uso de sistemas modulares compuestos es HORMIPRESA, empresa con sede en Barcelona, encargada del diseño y construcción de viviendas de alta gama empleando elemento de hormigón, acero o madera en función del diseño buscado. Este tipo de fabricación es un claro ejemplo del potencial de la construcción modular, llegando a construir viviendas de altísima calidad, con cualidades acústicas, térmicas y estructurales mucho mejores que las viviendas tradicionales a un precio muy competitivo y con plazos de construcción y entrega mucho menores.



Ilustración 19:: Ejemplo de vivienda de alta gama construida con materiales compuestos de acero y hormigón (Hormipresa)



4.2 Reutilización de contenedores del transporte marítimo:

Dado que el transporte marítimo de mercancías mediante el uso de contenedores crece cada año y ante la enorme cantidad de contenedores que a diario se retiran de su uso, varios diseñadores y arquitectos comenzaron a emplear estos contenedores como elemento constructivo, creando una nueva corriente dentro de la construcción modular. Estos contenedores puesto que ya han sido utilizados durante un tiempo, nos permiten eliminar el tiempo de diseño y fabricación de nuestros módulos, por otro lado, dichos contenedores disponen de varias medidas en función de la tipología, pudiendo así optar a diferentes diseños mediante su unión.

Gracias a la estructura que forma el propio contenedor no es necesario el diseño de cada parte del módulo por separado, por lo que tratamos los contenedores como un sistema modular diferente.

Si bien es cierto que el contenedor en si dispone de cerramientos, solado y cubierta, lo más recomendado es sustituir dichas partes del contenedor por otras que presenten mejores características tanto aislantes como estéticas.

Las características principales de los contenedores como elemento estructural son:

- Elemento estructural completo (solado, cerramiento, cubiertas, etc)
- Ahorro de material
- Reutilización de contenedores
- Necesidad de utilización de maquinaria pesada para su colocación
- Dificultad de transporte hasta zonas complicadas
- Facilidad de apilado
- No necesita grandes cimentaciones
- Capacidad de modificación de los módulos
- Necesidad de modificaciones estructurales y aislantes
- Necesidad de aplicación de productos anticorrosión.

Gracias a estas cualidades, el uso de contenedores reciclados se puede considerar una buena opción para la realización de edificaciones modulares en zonas con grandes poblaciones y con buena accesibilidad.

En contraposición, uno de los principales inconvenientes de estos sistemas modulares reside en, como en el caso de los sistemas ligeros, su apariencia. Como ya comentamos anteriormente, históricamente se ha empleado el hormigón como material constructivo y por esto, realizar la construcción de viviendas u hospitales mediante el uso de contenedores reutilizados puede no ser del agrado del usuario medio. Es por esto que este tipo de sistemas modulares no han sido muy usados en la historia reciente pero, gracias a determinadas empresas punteras en el sector, se están viendo cada vez más en construcciones tanto de viviendas como de obra civil.



Otro de los inconvenientes se basa en las medidas estandarizadas de dichos contenedores, ya que estos vienen dados del comercio marítimo, por lo que o bien realizamos estructuras muy simétricas y con repetición continua de dichos módulos o deberemos modificar estos contenedores para casos excepcionales. Es por esto que este tipo de soluciones constructivas se emplean para construcciones en las que nos beneficia el uso y repetición de módulos iguales, o bien, donde los acabados industriales sean del agrado del cliente.

Por otro lado, los contenedores son simplemente chapas de acero unidas formando una estructura modular, por lo que su solado, cerramientos y cubiertas dejan mucho que desear. Uno de los inconvenientes principales de la elección de esta solución frente a cualquier otra se basa en la necesidad de realizar grandes trabajos de aislamiento, impermeabilización y tratamiento del acero de los contenedores en la zona de emplazamiento de la estructura o bien, en fabrica. En la mayoría de ocasiones, en zonas donde se ha producido una catástrofe climática o humanitaria no se dispone de material o personal cualificado para tratar correctamente los contenedores dotándolos del aislamiento mínimo necesario.

Pese a que los contenedores disponen de medidas estándar que facilitan su traslado, no siempre será fácil su movilización. Los contenedores disponen de una anchura máxima de 2,4 metros, insuficiente para la realización de espacios habitables con unas cualidades aceptables de habitabilidad, por otro lado, como máximo, un contenedor estándar presenta una altura de 2,46 m, 4 cm menos que la altura mínima exigida por normativa para que un espacio sea habitable. Es por todo esto que, pese a que podamos transportar un módulo fácilmente, para la construcción de espacios adecuados necesitaremos la unión de varios de estos módulos, factor que en algunos casos puede llegar a ser un problema dependiendo de los medios de los que dispongamos en la zona de emplazamiento.

Pese a todo esto, si conseguimos solucionar la problemática del aislamiento y de la unión de los contenedores podemos conseguir construir edificaciones de hasta 10 alturas sin necesidad de elementos estructurales adicionales, como veremos en el apartado de ejemplos. También, gracias a la amplia base de nuestro sistema modular, la transmisión de esfuerzos al terreno se distribuye en una superficie muy grande, por lo que no sería necesario la construcción de cimentaciones notables más allá de una correcta compactación del terreno o una losa de cimentación mínima.

Una de las empresas pioneras en la construcción de edificaciones y viviendas empleando contenedores de mercancías es Container City, empresa especializada en el tratamiento de contenedores marítimos y el diseño estructural de edificaciones empleando estos.

Además de ser muy rentables económicamente, este tipo de sistemas modulares reducen el impacto ambiental ya que están fabricados con un 80% de materiales reciclados. Gracias a su carácter modulares, nos permite conseguir estructuras resistentes y de fácil disponibilidad. Asimismo, no es necesario dejar la edificación con su acabado de fachada de contenedores ya que de manera sencilla se puede proceder a su recubrimiento con cualquier tipo de material, factor que, dependiendo de donde estemos situados, puede no ser tan sencillo de realizar.



Ilustración 20: Contenedores siendo izados (Container city)

Todos los módulos son diseñados con puertas, ventanas y balcones, realizados también con contenedores, lo que da a la estructura un aspecto de vivienda completa. Como comentamos anteriormente, estos contenedores necesitan de trabajos previos de acondicionamiento para poderse considerar habitables, ya sea térmica, estructural o acústicamente. Por último, es necesario pintar cada unidad con productos anti corrosión para evitar la herrumbre de nuestros módulos, aspecto a tener en cuenta a la hora de escoger que solución es la más indicada para nuestra problemática.

4.3 Aplicaciones y ejemplos reales:

En este apartado mostraremos algunos ejemplos de construcción modular aplicándose a la construcción de bloques de oficinas, escuelas o viviendas privadas, entre otros, mostrando como este tipo de soluciones constructivas son cada vez más utilizadas a nivel mundial.

Sistemas modulares ligeros:

- Acero:

Un claro ejemplo de utilización de sistemas modulares ligeros es **La casa R128 de Werner Sobek** ubicada en Stuttgart, Alemania. Esta vivienda fue diseñada bajo un esquema modular, permitiendo su fácil desmontado con el fin de utilizar sus paneles en otras viviendas.



Ilustración 21: Casa R128 de Werner Sobek.



Ilustración 22: Casa R128 de Werner Sobek

Como se aprecia en las imágenes, esta construcción cumple con las bases de la construcción modular: repetición de módulos, amplitud de espacios, versatilidad en sus acabados, ligereza y facilidad de montaje-desmontaje, entre otros, consiguiendo una vivienda de gama alta, con posibilidad de ser definitiva aprovechando al máximo las cualidades de los materiales.

- Madera:

Dentro de los variados ejemplos de aplicaciones de sistemas modulares de madera encontramos el **Refugio Monte Rosa, en los Alpes suizos**. Este refugio construido íntegramente en madera fue movilizado, panel a panel, mediante un helicóptero, lo que nos muestra una de sus características principales, la ligereza. También es una clara muestra del carácter aislante y de confort que nos proporciona este tipo de soluciones.



Ilustración 23: Casa R128 de Werner Sobek

- Materiales compuestos:

Dentro del uso de los materiales compuestos encontramos a la empresa Holland Composites Industrials, diseñadora de los módulos Spacebox.

Spacebox es un módulo habitacional ligero, realizado en composite, material que confiere suficiente estabilidad estructural para poder apilar hasta 3 alturas sin necesidad de elementos resistentes adicionales. Como bien comentamos en apartados anteriores, este tipo de soluciones nos permite acabar completamente el módulo en taller o llevarlo por piezas, en este caso los módulos son terminados completamente en fábrica y transportados íntegramente hasta la zona en cuestión, donde con la ayuda de una grúa simple y 4 operarios se consigue su instalación. Este sistema nos ofrece módulos de 18-24m² y unos pesos que oscilan entre los 2500-3500 kg.



Ilustración 24: Módulos Spacebox, residencia universitaria en Utrecht, Holanda.



Sistemas modulares pesados:

Si hablamos de sistemas modulares pesados reutilizables, no podemos olvidarnos de **La Arena del Futuro**, el estadio Olímpico construido para albergar el campeonato de balonmano de lo JJ.OO de Rio 2016. Este estadio con capacidad para 12000 espectadores, fue diseñado de forma que , una vez terminados los juegos olímpicos, pudiera ser desmontado y reutilizado para la construcción de 4 escuelas, con un coste estimado de desmontaje de 7 millones de dólares y unos 5 meses de trabajos.



Ilustración 25: La Arena del Futuro (Rio de Janeiro).

Sistemas modulares compuestos:

Dentro de los sistemas modulares compuestos encontramos el "**Kaden Klingbeil**" de Berlín, construido en hormigón, acero y madera. Este tipo de edificios son una muestra de las capacidades de la construcción modular compuesta, donde un correcto uso de los materiales y sus características nos permite llevar a cabo obras que se ajusten a las exigencias de cada zona.



Ilustración 27: Casa R128 de Werner Sobek



Ilustración 26: Casa R128 de Werner Sobek

Uso de contenedores:

En el apartado del uso de los contenedores como elementos constructivos, podemos mostrar dos claros ejemplos, siendo estos las aulas del **Tower Hamlets College de Londres** y el rascacielos de 100 m de altura fabricado íntegramente con contenedores diseñado por **Ganti + Associates (GA) Design en Bombay**.

El primero de nuestros ejemplos es el aulario del Tower Hamlets College, formado por contenedores apilados en 3 pisos. Este ejemplo es especialmente destacable dado que se utiliza para construir algo tan significativo como aulas para impartir clase. Esto nos hace darnos cuenta del potencial de este sistema constructivo y de como , cada vez más, se normaliza este tipo de soluciones.



Ilustración 28: Aulas del "Tower Hamlets College"

Por otro lado podemos hablar del mejor ejemplo de uso masivo de contenedores de los últimos años. En este caso tenemos el rascacielos de 100 metros diseñado por Ganti + Associates (GA) Design en Bombay, donde mediante el apilado de 10 contenedores en altura consigue construir un edificio completo de 10 pisos sin soporte estructural adicional, formando apartamentos mediante la unión de 3 contenedores. Esta solución se complementa perfectamente con la ciudad de Bombay dado que esta dispone de un puerto comercial importante donde se produce un tráfico de contenedores enorme. El uso de este sistema constructivo consiguió mostrar al mundo otro tipo de construcción, una mucho más eficiente y respetuosa con el medio ambiente, convirtiendo los problemas (existencia masiva de contenedores retirados de su uso) en soluciones (edificio en zona marginal dotado de todas las calidades necesarias para una habitabilidad correcta).



Ilustración 29: Edificio de 100 m en Bombay.

Uno de los indicadores más claros de la idoneidad de este tipo de soluciones en grandes ciudades es el uso cada vez mayor de este tipo de sistemas para ciudades tan importantes como Nueva York.

En 2013 se propuso un concurso para escoger el mejor diseño de microviviendas con el fin de construir bloques de pisos en zonas donde el espacio era el mayor limitante. El ganador del concurso consiguió diseñar un edificio compuesto por 55 módulos prefabricados de entre 23.2y 34.4 m², con techos de unos 3 metros de altura, demostrando que con un correcto uso del espacio se pueden crear viviendas completas en zonas muy reducidas



Este tipo de iniciativas muestran el verdadero potencial de estas soluciones constructivas y de como la construcción modular también puede ser sinónimo de calidad, confort, velocidad de construcción y ahorro energético, entre muchas otras.



Ilustración 30: Diseño concurso Nueva York 2013

Como hemos podido ver a través de estos ejemplos, este tipo de soluciones constructivas nos abren un abanico de posibilidades que la construcción tradicional no contempla. Gracias a los avances en materia de diseño e industrialización de los procesos constructivos, podemos adaptar nuestra estructura a las exigencias de cada lugar o problemática que encontremos.

Es por todo esto que en los apartados siguientes diseñaremos un módulo prefabricado desde cero, escogiendo el sistema modular más adecuado para nuestro diseño, sus medidas e integridad estructural así como el modo de transporte más idóneo para su desplazamiento, todo ello partiendo de la premisa de que nuestro módulo ha de emplearse en casos de emergencia, por lo que sus características han de premiar la habitabilidad y durabilidad en lugares complicados más que centrarse en la belleza o en el confort.



5. Estudio de alternativas:

Una vez analizados los diferentes sistemas modulares más usuales que existen en la actualidad así como de sus ventajas e inconvenientes procederemos al estudio de alternativas, en el cual describiremos las diferentes alternativas en función del sistema modular escogido.

En primera instancia, escogeremos una alternativa de las descritas dentro del apartado sistemas modulares para, posteriormente compararla con los contenedores de transporte marítimo.

Para escoger la mejor alternativa emplearemos el análisis multicriterio, realizando uno para escoger la mejor opción dentro de los sistemas modulares y, seguidamente, realizaremos otro más para determinar que opción es la mejor de entre esta última y el uso de contenedores marítimos.

Como resultado de este análisis obtendremos la mejor alternativa de acuerdo a nuestras valoraciones, la cual será objeto del diseño de nuestro módulo.

5.1 Definición de las alternativas:

Como hemos visto en los apartados anteriores, existen múltiples diseños en función de las necesidades de cada proyecto con sus respectivas ventajas e inconvenientes. En este apartado describiremos los principales diseños, los cuales se adaptan de mejor manera a nuestras exigencias.

Acero:

Dentro de los sistemas modulares fabricados en acero encontramos dos variantes bien diferenciadas. Por un lado tenemos los sistemas modulares fabricados por partes y unidos in situ en la zona objetivo, por el otro encontramos los sistemas modulares tridimensionales, fabricados íntegramente en taller y transportados como un "todo uno" hasta el lugar de emplazamiento.

Puesto que nuestro módulo ha de ser desplazado hasta la zona en cuestión, pudiendo ser complicada su movilización, tenemos que tener en cuenta las dimensiones de nuestro módulo. Es por esto que dentro de estas dos variantes dentro de los sistemas fabricados en acero, nos decantaremos por el sistema modular diseñado y fabricado por partes, facilitando su desmontaje y movilización.

En primer lugar, si hemos de transportar nuestro módulo por la vía marítima no podemos transportarlo montado, ya que ha de ir siempre dentro de un contenedor correctamente trincado, lo que nos limita aún más las dimensiones de cada módulo.



Es por esto que hemos de optar por una opción que nos permita dividir el módulo en partes fácilmente ensamblables posteriormente, de forma que podamos organizar los contenedores de transporte de tal manera que podamos movilizar uno o más módulos dentro de cada contenedor, en función del peso y del volumen.

Como principales ventajas que podemos obtener de la elección del sistema modular ligero de acero fabricado por piezas tenemos la capacidad de transportar en un mismo contenedor varios módulos a la vez. Por otro lado, dado que todas las piezas se diseñan y fabrican en taller, podemos realizar el diseño enfocándolo a la unión sencilla en obra de todas sus partes, minimizando la necesidad de personal especializado en el lugar de construcción. Consecuentemente, dado que las piezas se transportan por separado, si conseguimos diseñar el módulo empleando elementos que individualmente no resulten muy pesados, podemos eliminar la necesidad de usar grúas de gran tonelaje.

Como posibles inconvenientes del uso de esta solución encontramos el coste, más alto que en otros sistemas modulares. Asimismo, necesitamos un diseño muy detallado y prestando mucha atención a las uniones entre elementos, dado que, en muchas ocasiones, no dispondremos de personal especializado y deberemos de unir los elementos mediante unión seca, teniendo que diseñar todas las uniones de forma que sean lo más sencillas y precisas posibles.

Como apoyo para nuestro diseño podemos escoger el diseño Cuatro50, el cual emplea paneles de 4,5x4,5 m sobre los cuales monta los cerramientos y cubiertas necesarias. Este tipo de sistema sería un buen punto de partida para el diseño de un módulo propio de estas características.



Ilustración 31: Ejemplo montaje panel Cuatro50



Madera:

Puesto que para el caso que nos ocupa necesitamos soluciones desmontables, los sistemas fabricados en madera quedarían descartados debido a que estos sistemas, una vez fabricados y colocados no es posible su desmantelamiento y reutilización, factor clave en el diseño de nuestro módulo.

Materiales compuestos:

Como hemos visto en apartados anteriores, los materiales compuestos nos proporcionan una ligereza extraordinaria así como una resistencia a ambientes agresivos, humedades y sismos bastante alta.

Por su carácter modular nos permite la fabricación por partes, tal y como le exigimos a los sistemas de acero, esto sumado a su gran ligereza nos facilita enormemente la tarea de transporte y montaje, ya que los sistemas como el BAUKIT solo necesitan 4 operarios no especializado y un día de trabajo para poder montar una vivienda de 30m². Pese a que, según el fabricante, los propios paneles pueden servir de contenedor de transporte de este tipo de soluciones, hemos de recurrir a contenedores marítimos en caso de necesitar transportarlos por esta vía, lo que no dejaría en el mismo lugar que con las soluciones de acero.

Como principales inconvenientes tenemos la poca versatilidad de modificaciones que presentan estos sistemas, puesto que en caso de necesitar realizar aberturas en algún panel no sería posible, dado que este tipo de paneles van sellados al vacío, no pudiendo alterar este estado.

Otro de sus inconvenientes es el alto coste de fabricación ya que emplea materiales de última generación y muchos procesos en taller para conseguir las condiciones de estanqueidad y resistencia objetivo.

Como ejemplo de diseño de sistemas modulares con materiales compuestos podemos tomar el sistema BAUKIT de ABS, ligero, desmontable, resistente y aislante.



Ilustración 32: Sistema desmontable BAUKIT



Hormigón:

Las construcciones prefabricadas realizadas en hormigón son las más extendidas mundialmente como hemos visto en los apartados anteriores ya sea por sus características ampliamente conocidas o por la concepción que la sociedad tiene sobre este material, haciendo que sea escogido frente a otro tipo de soluciones, en ocasiones, mejores.

Podemos diseñar este tipo de soluciones para que sean desmontables, carácter necesario de nuestro diseño, pero no es su punto fuerte. Por otro lado, la movilización de las piezas necesarias para su construcción es mucho más complicada que las de otros sistemas anteriormente expuestos. Pese a esto, la opción más viable dentro de los sistemas modulares pesados son aquellos en los cuales diseñamos los paneles por separado, ensamblándolos posteriormente.

Si bien es cierto que nos proporciona unas resistencias y durabilidades de décadas, para el caso que nos ocupa no es necesario que este tipo de estructuras duren tanto tiempo, si no que sean habitables durante el periodo de necesidad de ayuda, que puede extenderse desde semanas hasta meses.

Como principal inconveniente podemos encontrar el excesivo peso del módulo completamente acabado, factor que puede hacernos necesitar realizar cimentaciones así como el uso de grandes grúas para el correcto manejo y colocación de las piezas junto con personal especializado en este tipo de obras. Este inconveniente en particular puede llegar a ser un problema considerable si no disponemos de este tipo de elementos en la zona de trabajo, caso que puede darse puesto que estamos partiendo del supuesto de una catástrofe humanitaria o climática.

Otro de los problemas que encontramos sería el alto coste de transporte marítimo, debido a que hemos de transportarlo dentro de contenedores reglamentarios, estos tienen restricciones tanto de volumen como de peso, restricciones que pueden impedir que transportemos más de un módulo por contenedor o necesitando contenedores mayores, lo que aumentaría significativamente el coste de esta solución.

Pese a todo esto, los sistemas pesados realizados en hormigón son una excelente opción para zonas sometidas a factores climáticos extremos, puesto que son capaces de soportar dichas inclemencias sin apenas recibir daños, así como tolerar la humedad de manera más que aceptable.

En caso de escoger este tipo de sistemas para nuestro diseño podríamos emplear como apoyo el sistema BSCP (Building System with Concrete Panel), el cual nos permite conformar prácticamente cualquier tipo de módulo mediante la unión de paneles de hormigón, facilitando la tarea de construcción de grandes espacios habitacionales.



Contenedores:

Como hemos visto en los apartados anteriores, los contenedores de transporte marítimo han sido definidos como una variante diferente de los sistemas modulares estándar, debido a sus características peculiares.

Los contenedores son la solución más "ecológica" y accesible debido a que ya están fabricados dichos módulos. También podemos considerar que es la opción más fácilmente movilizable puesto que disponen de medidas estándar que coinciden con los principales medios de transporte tanto marítimo como terrestre y, por otro lado, podemos apilar varios pisos de forma simple y sin necesidad de elementos estructurales adicionales.

A pesar de todo esto, este sistema modular presenta varios inconvenientes serios como son la necesidad ineludible de tratar dichos módulos, uno a uno, para dotarlos de los aislamientos acústicos, térmicos y contra humedad mínimos para poder considerar dicho contenedor habitable, factor que contrarresta la facilidad de adquisición de los contenedores.

Por otro lado, los contenedores no disponen de ventilación o ventanas de ningún tipo, por lo que sería necesario realizar un diseño previo para determinar en qué contenedores sería necesario realizar modificaciones para colocar ventanas o bien realizar uniones entre varios contenedores para conseguir espacios mayores.

También es necesario aplicar productos anticorrosión para evitar que los contenedores se degraden en caso de estar en correctas condiciones y, en caso de estar muy usados o corroídos, realizar procesos de mejora de la estructura.

Si bien es cierto que este tipo de sistemas son los más rápidos a la hora de adquirir, movilizar y construir, necesitan de unos procesos previos muy grandes con el fin de adecuar los módulos para que cumplan con las normativas de habitabilidad de cada país, por no hablar de los trabajos que se han de realizar in situ. Esto último puede ser, igual que en los sistemas pesados, un gran limitante dado que no siempre dispondremos de mano de obra especializada o del material necesario para su tratamiento in situ.

Todos estos factores han de preverse a la hora de decidirse por un sistema modular como este. Pese a todo, si se consigue realizar una correcta planificación disponiendo de los módulos cuando sea necesario una respuesta rápida, este sistema se convierte en una solución muy a tener en cuenta en casos de necesitar módulos con presteza.

Como inspiración en el diseño de nuestro módulo podemos tomar prácticamente todas las construcciones realizadas por Container City, puesto que llevan la distribución del espacio, reutilización de materiales y consecución de calidades y aislamientos óptimos a su máximo exponente dentro de este tipo de soluciones.



5.2 Definición de las características determinantes:

Para diseñar nuestra matriz de evaluación multicriterio definiremos qué aspectos son los más importantes en nuestro módulo apoyándonos en todo lo visto anteriormente, describiendo cada característica y determinando un peso dentro de nuestro análisis.

- Ligereza:

Dado que nuestro módulo va a estar diseñado para ser utilizado en zonas afectadas por catástrofes climáticas o humanitarias puede que no dispongamos de maquinaria pesada teniendo que recurrir a grúas simples y a la mano de obra poco cualificada.

Por otro lado, dado que nuestros módulos tendrán que ser transportados por tierra, mar o aire, hemos de tener en cuenta que el peso de las piezas puede ser un limitante a la hora de gestionar su transporte, económica y logísticamente.

Es por esto que nuestro módulo ha de estar fabricado con el material o sistema modular que nos permita conseguir los perfiles más ligeros y resistentes posibles.

- Transporte:

Otro de los principales factores a tener en cuenta es el transporte de dichos módulos hasta las zonas afectadas. Dado que estas zonas han sido devastadas por una catástrofe natural o similar, puede darse el caso de que no se disponga de vehículos adaptados para el transporte y montaje de determinadas piezas, por lo que la sencillez de transporte, ligereza, y manipulación deben de premiar en este tipo de módulos.

Por otro lado tenemos que tener en cuenta la facilidad de transportar gran cantidad de módulos de un país a otro mediante el transporte marítimo, terrestre o aéreo en el menor tiempo posible, asegurándonos así un despliegue rápido y efectivo hasta las zonas donde se requieran dichos módulos, por lo que la facilidad de transporte ha de ser uno de los factores más determinantes.

- Rapidez de montaje:

Como hemos comentado anteriormente, la rapidez de montaje varía en función del tipo de sistema modular, variando desde 1 día de trabajo por módulo de los sistemas modulares realizados con materiales compuestos hasta varios días para los sistemas modulares pesados. Este aspecto es una de las piezas clave para dotar de valor a nuestra alternativa en casos de emergencia, puesto que en cuestión de días pueden construirse estructuras completamente funcionales, resistentes y durables, incluso pudiendo llegar a ser permanentes.

Esta característica es una de las que mejor define la construcción modular y la que más valor le da para casos como los que nos ocupan, ofreciéndonos la posibilidad de realizar construcciones simultáneas con la ayuda de grúas sencillas y personal reducido.



- Durabilidad:

Uno de los aspectos que suelen pasarse por alto a la hora de proponer alternativas frente a este tipo de casos de emergencia es la durabilidad de las estructuras proyectadas. En muchos casos se piensa en la construcción modular como "barracones" o estructuras sencillas y efímeras, generalmente de mala calidad. En el caso que nos ocupa se pretende diseñar un módulo que, mediante la unión sucesiva de dichos módulos, nos genere una estructura completamente funcional, resistente, durable o incluso permanente si fuera necesario aunque, la premisa principal de este diseño es que sea desmontable, pudiendo ser utilizado en varias ocasiones.

Por esto, pese a no ser uno de los factores determinantes para nuestro diseño ha de cumplir con unas condiciones de durabilidad aceptables.

- Capacidad de desmontaje:

Como se ha visto anteriormente, la característica principal de nuestro diseño ha de ser la capacidad de ser desmontable, puesto que nuestro módulo está pensado para servir de apoyo durante un periodo de tiempo, después del cual la estructura será desmontada y devuelta al lugar de origen donde, después de un proceso de rehabilitación puede estar lista para volverse a utilizar.

El diseño de este módulo viene de la problemática que surge cuando una catástrofe como las expuestas ocurre, momento en el cual ha de enviarse ayuda humanitaria ya sea en forma de alimentos, personal o capital. Este diseño tiene como meta dar solución a esa elección diseñando un módulo capaz de ayudar enormemente a la población y de una manera mucho más efectiva que el dinero. De esta forma, mediante la inversión de capital en la fabricación de estos módulos podemos enviar ayuda útil de forma inmediata y, posteriormente, reutilizar dicho capital, reduciendo así el coste económico que este tipo de situaciones causa.

Es por todo esto que la capacidad de desmontaje de nuestro módulo ha de ser la piedra angular del diseño.

- Sencillez constructiva:

De igual forma que con el criterio relacionado con la ligereza, en la zona en cuestión puede darse el caso de no disponer ni de mano de obra cualificada ni de herramientas específicas por lo que hemos de diseñar nuestro módulo para poder construirse con herramientas simples y sin prácticamente nociones de edificación. Esto se traduce en un trabajo previo de diseño tanto estructural como de las uniones, buscando en todo momento soluciones sencillas pero efectivas.

Este parámetro junto con la capacidad de desmontaje y la facilidad de transporte serán las que acapararán una mayor ponderación.



- Coste económico:

Por último tenemos el apartado económico. Este factor, pese a ser una solución diseñada para casos de emergencias humanitarias en las cuales el coste no suele ser un problema, ha de ser lo más ajustado posible. Este módulo está concebido como elemento de apoyo para ese tipo de casos, en el cual muchos países envían grandes cantidades de dinero para apoyar la causa, mientras que con este sistema, pretendemos crear un elemento con el cual enviar la misma cantidad de capital pero con un valor añadido, ofreciendo algo tangible, que realmente aporte soluciones instantáneas más allá de capital para alimentos o futuros proyectos.

Por todo esto, pese a ser un apartado muy importante en el mercado privado, en nuestro caso tendrá una importancia baja.

5.3 Análisis multicriterio:

Como hemos comentado en el apartado de alternativas, en primera instancia disponemos de 5 tipos de sistemas modulares con sus respectivos diseños base como son: acero, hormigón, madera, materiales compuestos y contenedores.

El sistema modular fabricado con madera, debido a sus características, ha sido eliminado del multicriterio, puesto que muchas de sus cualidades no son competitivas frente a los demás sistemas y de este modo ahorramos alternativas.

De las 4 alternativas que nos restan, analizamos el acero, hormigón y los materiales compuestos por un lado, y, posteriormente, con la mejor alternativa de estas tres realizaremos otro análisis comparándolo con el uso de contenedores ya que, como explicamos varios apartados atrás, consideramos el sistema modular con contenedores como un sistema individual con características particulares.

Dentro de la matriz de nuestro análisis multicriterio hemos ponderado con el mayor peso (0.25) la capacidad de desmontaje debido a la gran importancia de esta cualidad en nuestro diseño.

Seguidamente hemos ponderado por igual (0.2) la facilidad de transporte y la sencillez constructiva, esto se debe a la gran necesidad que tiene nuestro módulo de ser fácilmente movilizado y construido.

En tercer lugar ponderamos con el mismo valor (0.1) la ligereza, rapidez de montaje y durabilidad, dándole una importancia media a estos valores respecto a los descritos anteriormente puesto que nuestro diseño ha de ir más enfocado a facilitarnos su movilización y construcción antes que su durabilidad durante años o su construcción inmediata.

Por último hemos ponderado con el valor más bajo (0.05) la componente económica, ya que no es una característica decisiva en nuestro diseño.



Del uso de estas ponderaciones junto con los pesos que hemos considerado más adecuados para cada alternativa hemos realizado el análisis, obteniendo los valores que caracterizan cada alternativa.

En primer lugar, con la nota más baja (5.05) tenemos la solución diseñada en hormigón. Como bien hemos ido exponiendo a lo largo del presente trabajo, el hormigón pese a ser una solución de confianza, muy resistente y estable, no presenta unas cualidades óptimas para su uso modular en casos tan específicos como el nuestro. Si bien es cierto que su uso como sistema modular es ampliamente conocido por sus buenos resultados, para un caso extremo en el que necesitamos soluciones de compromiso entre versatilidad, facilidad de transporte y ligereza no puede competir con las demás alternativas. Pese a esto, continua siendo una solución de garantías para otros supuestos menos exigentes.

En segundo lugar tenemos los materiales compuestos (7.05) cuya nota está muy cerca de la mejor alternativa, pero con algunas salvedades. La primera de ellas reside en el alto coste de fabricación de este tipo de materiales, debido que la fabricación de materiales compuestos puede costar entre 9-38 euros por kg mientras que los materiales estándar de fabricación suelen rondar entre los 2-6 euros por kg. Por otro lado tenemos la capacidad de desmontaje de los módulos fabricados en materiales compuestos. Generalmente se unen mediante adhesivos muy fuertes, lo que impide su correcto desmontaje. Pese a estos inconvenientes, los materiales compuestos son, cada vez más, una propuesta de futuro, aportándonos altas resistencias junto con poco peso, factor determinante en grandes obras de ingeniería, pero, hasta que no se consigan fabricar estos sistemas a mucho menor precio no podremos considerarlos igual de competitivos que otras soluciones.

Finalmente tenemos el acero como mejor alternativa (7.55) dentro de los sistemas modulares "estándar". Esta solución modular ha sido la mejor valorada dentro del multicriterio dado que sus cualidades presentan un gran equilibrio entre ellas, consiguiendo mejores valoraciones que sus competidoras en cada apartado.

El acero y los materiales compuestos han sido las dos alternativas con mejor nota, distanciándose solamente 0.5 puntos. Esto se debe principalmente a dos factores, por un lado tenemos la diferencia de coste de fabricación, factor determinado por el amplio conocimiento del acero y de sus procesos de fabricación que nos permite reducir mucho su coste. Por otro lado, tenemos la capacidad de desmontaje de los módulos, característica totalmente necesaria para nuestro diseño y que dentro del análisis multicriterio ha decantado la balanza hacia el lado de la solución de acero.



Criterio	Peso	Acero	Hormigón	Materiales compuestos
Ligereza	0.1	8	3	9
Transporte	0.2	7	5	8
Rapidez de montaje	0.1	8	3	9
Durabilidad	0.1	8	10	5
Capacidad de desmontaje	0.25	8	4	6
Sencillez constructiva	0.2	7	5	8
Coste económico	0.05	7	9	1
		7.55	5.05	7.05

Criterio	Peso	Acero	Contenedores
Ligereza	0.1	8	3
Transporte	0.2	7	6
Rapidez de montaje	0.1	8	9
Durabilidad	0.1	8	8
Capacidad de desmontaje	0.25	8	7
Sencillez constructiva	0.2	7	8
Coste económico	0.05	7	9
		7.55	7

Tras determinar qué sistema modular es el mejor valorado dentro de nuestro análisis multicriterio procedemos al análisis de los sistemas modulares de acero frente a los sistemas modulares con contenedores marítimos.

Para esta valoración hemos mantenido tanto las ponderaciones de cada característica como las valoraciones del sistema fabricado en acero, proporcionando nuevas valoraciones para el sistema de contenedores. Tras realizar el cálculo obtenemos una nota de 7 para los contenedores frente al 7.55 de los sistemas de acero.

Tal y como esperábamos, el sistema fabricado con perfiles de acero es la mejor solución de todas las alternativas propuestas. En este último análisis hemos podido comprobar cómo, pese a las grandes cualidades de los contenedores como su reutilización, estandarización de dimensiones y capacidad de apilado, entre otras, no es la mejor solución para un caso como el que nos ocupa. Uno de los principales lastres de este sistema modular es la ligereza, factor que nos condiciona a la hora de manejar los módulos.

Estos módulos precisan de maquinaria pesada para ser movilizados y apilados, necesidades que pueden no verse cubiertas en nuestros supuestos. Por otro lado tenemos su transporte, de igual forma que con los perfiles de acero podemos llegar a transportar varios módulos en el mismo contenedor marítimo, en el caso de los sistemas modulares con contenedores no se da este caso, puesto que cada contenedor es un módulo, ampliando el espacio de transporte necesario y el coste de movilización total de nuestras edificaciones.



5.4 Definición del sistema modular definitivo:

Tras haber sometido nuestras alternativas al análisis multicriterio, hemos obtenido como mejor alternativa los sistemas modulares fabricados en acero, más concretamente los sistemas fabricados por piezas individuales, unidas en obra mediante uniones en seco. Esta decisión dentro de los sistemas de acero viene dada por la necesidad de transportar el mayor número de módulos posible con el menor coste, tanto en espacio como en capital. Por otro lado el transporte de los módulos desmontados nos permite un mejor manejo de las piezas, no necesitando grúas pesadas para construir viviendas de hasta dos pisos.

Finalmente nuestro módulo prefabricado de acero estará pensado para que sea ligero, fácilmente ensamblable, durable (dentro de las necesidades que tenemos), desmontable y transportable.

Como diseño base optaremos por apoyarnos en el diseño Cuatro50, el cual se basa en la fabricación por separado de los paneles necesarios para la fabricación de nuestro módulo, diseñando en taller todas las uniones y cerramientos. Esto nos permite, gracias a una correcta planificación y diseño de nuestra estructura, fabricar los cerramientos en taller incluyendo las ventanas, puertas, conducciones y demás, permitiéndonos así movilizar las piezas totalmente terminadas hasta la obra donde, mediante uniones sencillas, conseguiremos realizar espacios habitables con rapidez.

En los apartados posteriores analizaremos la integridad estructural y diseñaremos cada parte de nuestro módulo, analizando posteriormente la mejor forma de transportarlos por mar, dando una valoración económica final de todo el proceso.

6. Dimensiones y características de los módulos prefabricados:

Una vez determinado el tipo de sistema modular y sus materiales predominantes, pasamos a determinar sus dimensiones y características. Las dimensiones y geometrías específicas de cada elemento de los módulos prefabricados se pueden consultar en el ANEJO Nº 1: DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO PREFABRICADO.

A continuación se muestra un breve resumen de las dimensiones y características de los perfiles empleados.

6.1. Dimensiones:

Dentro de nuestro diseño, hemos querido realizar varias alternativas diferentes, con el fin de determinar la viabilidad de nuestro módulo en diferentes configuraciones tales como:

- Módulo individual.
- Un solo nivel formado por 3 módulos de largo y 3 módulos de ancho.
- Un nivel de 3x3 módulos más un segundo nivel de 2x3 módulos, dejando una zona de 3 módulos de anchura como terraza.



En primera instancia hemos diseñado un módulo de 2.4 metros de altura, 2.4 metros de anchura y 4 metros de longitud, consiguiendo así un módulo formado por perfiles de dimensiones manejables y ligeras.

Estas alternativas han sido pensadas para demostrar que nuestro módulo es perfectamente compatible en varias combinaciones, soportando las cargas aplicadas. Para ello, hemos determinado una serie de perfiles que, mediante una unión correcta, nos permita construir estructuras variadas.

Estos perfiles estarán definidos con detalle dentro del ANEJO N°1, pero a modo de resumen tenemos:

- Perfiles en L de 8 mm de espesor con 2.4 y 4 metros de longitud.
- Perfiles en T, formados por dos perfiles en L de 8 mm de espesor cada uno, con 2.4 y 4 metros de longitud.
- Perfiles en forma de aspa, formados por 4 perfiles en L de 8 mm de espesor con 2.4 y 4 metros de longitud.

De esta forma, con solo un tipo de perfil en L podemos conseguir todos los tipos de secciones que necesitamos para solucionar nuestra estructura tanto en vigas, como en pilares. La unión entre perfiles en L para formar los diferentes perfiles se realizará en fábrica, uniéndolas mediante soldadura.

Todos los perfiles metálicos estarán galvanizados, dotándolos así de resistencia a la corrosión y aumentando su vida útil.

6.2.Características:

Los perfiles que conforman nuestros módulos prefabricados estarán realizados en acero laminado en frío tipo A36/A36M-94, de acuerdo con las especificaciones del AISI 1996.

Puesto que se empleará este tipo de acero, las características mecánicas de nuestro material serán:

- Módulo de Elasticidad (E) : $2.073 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
- Módulo de Poisson (U): 0.33
- Coeficiente de dilatación térmica (A): $1.170 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- Módulo de elasticidad transversal (G): $7.793 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
- Límite elástico (Fy): 248 MPa
- Resistencia a tracción (Fu): 470 MPa



Por otro lado, una vez definidas las dimensiones y tipos de secciones de nuestras vigas, podemos obtener las propiedades de cada sección. Estas propiedades están definidas con detalle en el ANEJO N°1.

7.Análisis estructural:

Tras definir nuestros perfiles junto a sus características y dimensiones, realizamos el cálculo estructural de nuestros tres diseños.

Todos los cálculos, consideraciones, acciones y resultados estarán definidos en el ANEJO N°2 : CÁLULO ESTRUCTURAL.

Como se ha comentado en el ANEJO N°2, hemos optado por evaluar analíticamente las dos secciones (viga y pilar) más desfavorable del diseño más complejo, con el fin de evitar extendernos sobremanera en nuestros cálculos, por esto, hemos optado por evaluar el pilar y la viga más solicitada frente a la combinación de acciones número 2 del diseño numero 3, el cual hace referencia a la estructura de dos niveles.

A continuación se muestran los diseños obtenidos en el SAP2000 de nuestras 3 alternativas.

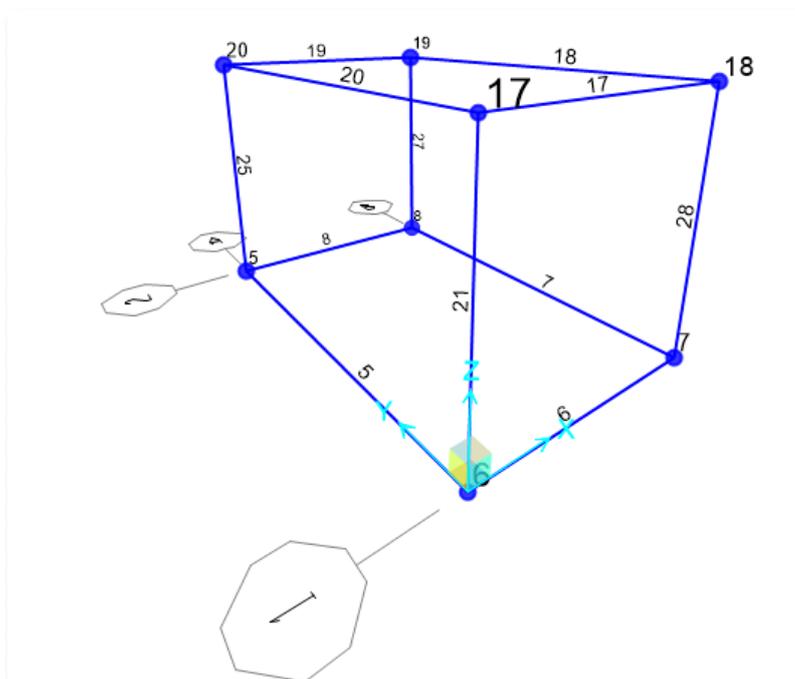


Ilustración 33: Diseño 1

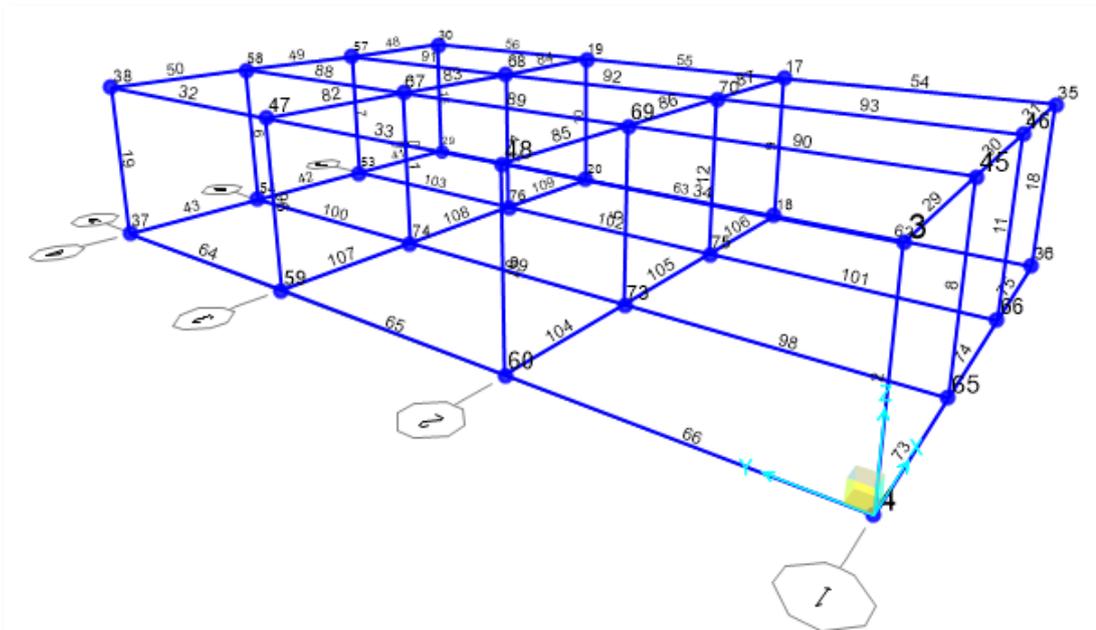


Ilustración 34: Diseño 2

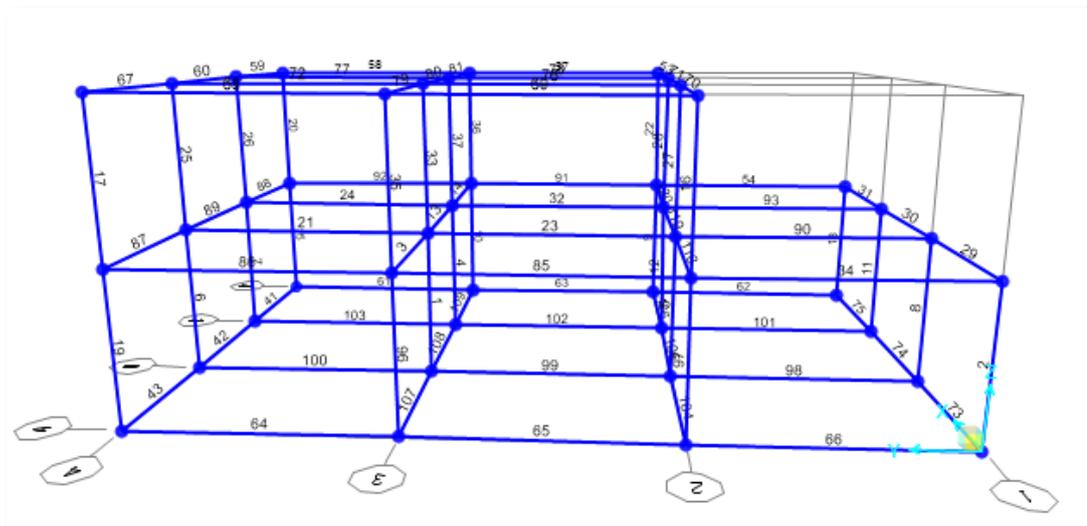


Ilustración 35: Diseño 3

Nuestros perfiles de acero laminado en trio se clasifican como secciones de clase 4, por lo que habrá que realizar la reducción de dichas secciones y evaluar su resistencia a partir de esos parámetros reducidos, estos procesos se ven reflejados en el ANEJO Nº2.

Para la viga y pilar se han realizado las siguientes comprobaciones:

- Momento flector
- Axil de compresión (solo en pilar)
- Esfuerzo cortante
- Aprovechamiento de la sección

Después de evaluar tanto la viga como el pilar y realizar las comprobaciones necesarias plasmadas en el ANEJO Nº2, hemos corroborado que dichas secciones cumplen frente a todas las solicitaciones aplicadas, obteniendo unos aprovechamientos del 91.75% para la viga y del 82.5% para el pilar, siendo estos unos valores correctos.

8. Diseño de uniones:

Para la unión de nuestros perfiles hemos optado por la utilización de agujeros rasgados cortos, permitiéndonos una mayor flexibilidad en el montaje, bajo el supuesto de que cabe la posibilidad de que no dispongamos en obra de personal cualificado.

Bajo estos supuestos hemos diseñado todas las uniones por igual situando 4 agujeros rasgados en los extremos de cada ala de nuestros perfiles, puesto que irán unidos entre sí, dos a dos.

En nuestro caso hemos calculado la unión más solicitada dentro del diseño más complejo, siendo este el nudo 58, calculando el extremo de la viga 89, tal y como se observa en la Ilustración 36.

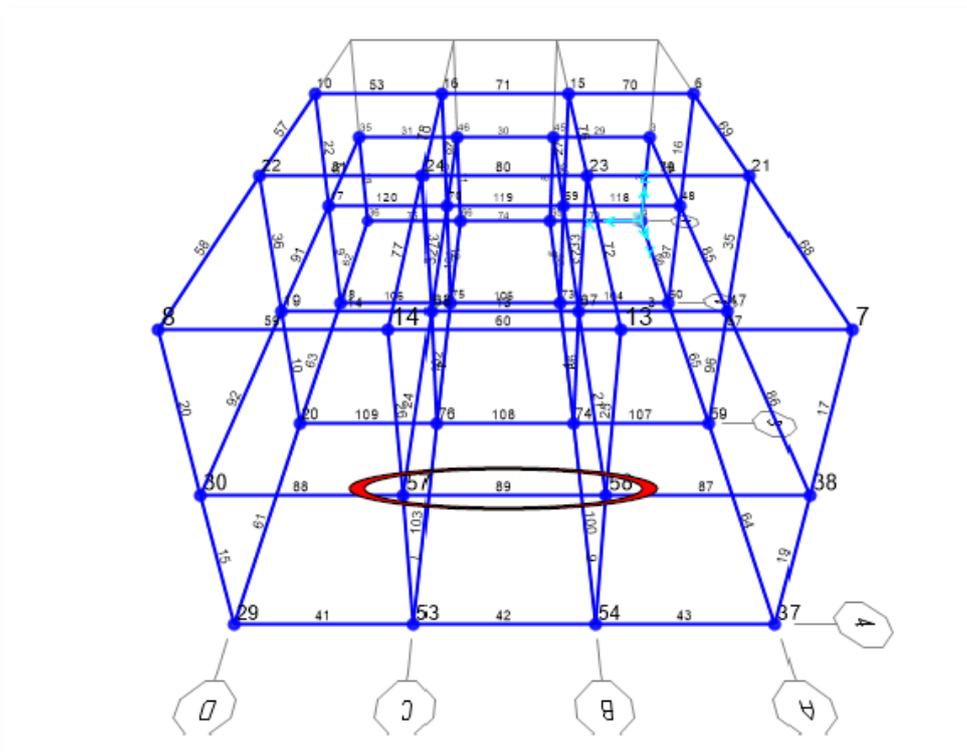


Ilustración 36: Nudo y viga estudiados



Dicha unión han sido calculada en el ANEJO Nº3 DISEÑO DE UNIONES, donde ha sido comprobada frente:

- Cortante
- Aplastamiento
- Tracción
- Punzonamiento
- Desgarro
- Cálculo del par de apriete de los tornillos.

Por otro lado se han determinado las disposiciones constructivas y los tornillos empleados, siendo estos tornillos de 18 mm de diámetro con agujeros rasgados de 22 mm.

Tras realizar las comprobaciones, se ha determinado que dicha unión resiste para las sollicitaciones de la combinación de acciones que más solicita la estructura, la combinación 2.

En el documento PLANOS se podrán observar los detalles de las uniones.

9.Diseño final:

Tras haber determinado los tipos de perfiles y paneles, podemos especificar el aspecto de nuestro módulo prefabricado una vez unidas todas las partes en obra. Todos los paneles y detalles han sido descritos en el ANEJO Nº4 DISEÑO FINAL, donde se han especificado todos los materiales, espesores, disposiciones constructivas y detalles finales a tener en cuenta en nuestros diseños.

En las Ilustraciones 37 y 38 se pueden observar los detalles del módulo individual totalmente conformado junto a una propuesta de acabados.

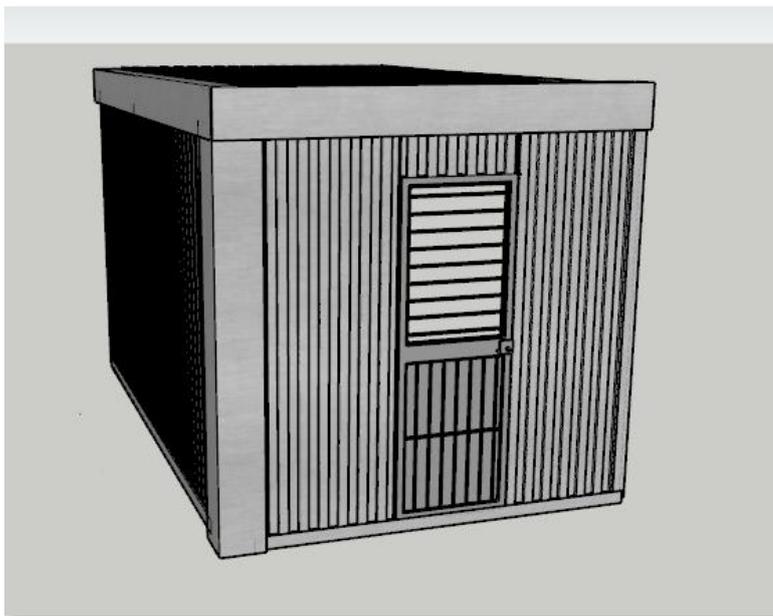


Ilustración 37: Vista detalles módulo

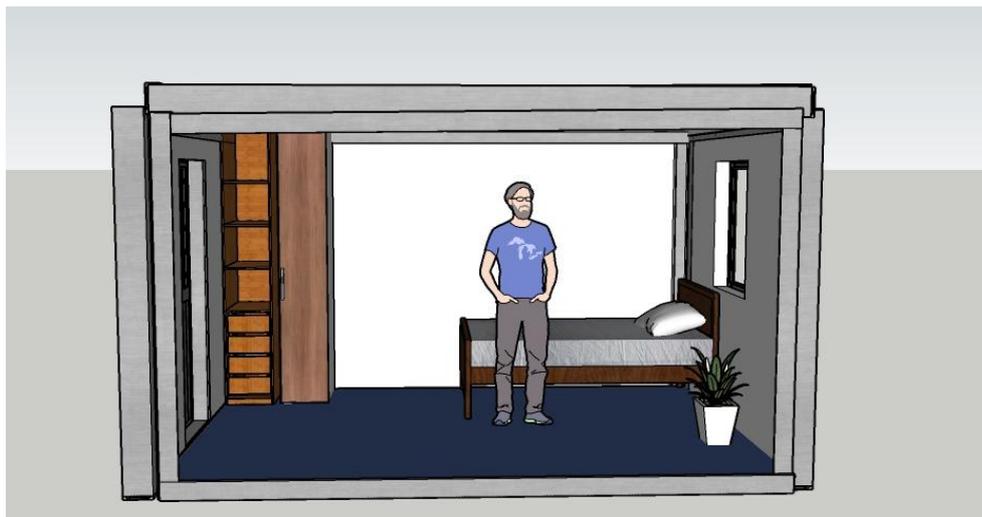


Ilustración 38: Propuesta de acabados interiores

10. Logística y modo de transporte:

Todo el proceso del transporte, así como la descripción de la documentación y coste de transporte de los módulos ha sido descrita con detalle dentro del ANEJO Nº5 LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, por lo que a continuación comentaremos a modo de resumen, las conclusiones obtenidas de su estudio.

En primer lugar hemos escogido los contenedores de 40 pies estándar High Cube para el transporte de nuestros módulos, ya que disponen de mayor volumen y altura que los de 40 pies estándar. Por otro lado, una vez determinado el tipo de contenedor hemos calculado la cantidad de viviendas que podemos transportar por cada contenedor, tal que:

- 5 diseños Nº1 por cada contenedor
- 1 diseño Nº2 por cada contenedor
- 2 diseños Nº3 por cada 4 contenedores.

Seguidamente se han descrito un caso práctico para el cual hemos definido los procesos documentales y establecido los tiempos estimados para cada fase, de manera que se tarda un total de 18 días, aproximadamente, desde que se recogen en fábrica los módulos hasta que se depositan en la zona objetivo, un tiempo razonable dentro de la situación que nos ocupa.

Por otro lado obtenemos un coste del transporte por contenedor de 2230 euros , siendo el coste del transporte total del caso práctico de 8920 euros.



11. Valoración económica:

En el ANEJO Nº6 VALORACIÓN ECONÓMICA hemos tratado en profundidad los precios unitarios de cada material o componente, así como la cantidad de elementos que conforman cada módulo, con el fin de determinar el coste unitario de fabricación de cada diseño.

A modo de resumen, los costes de fabricación de cada unidad de cada diseño son:

- Diseño 1: 3201 euros/ud , con un coste por metro cuadrado de 333,5 €/m².
- Diseño 2: 19598,4 euros/ud, con un coste por metro cuadrado de 226,83 €/m²
- Diseño 3: 31086 euros/ud, con un coste por metro cuadrado de 176,82 €/m²

Por otro lado se ha evaluado el coste unitario del transporte de cada contenedor, determinando, finalmente, el coste total de fabricación y envío para nuestro caso práctico, siendo este un total de 71092 euros.

12. Conclusiones:

De la realización del presente trabajo se pueden extraer una serie de conclusiones finales:

- Los módulos prefabricados en acero son la mejor alternativa posible para nuestro caso dentro de las que existen actualmente, por encima incluso de los contenedores marítimos.
- Hemos concebido 3 diseños diferentes, de menor a mayor complejidad estructural, para demostrar que nuestro sistema prefabricado es competente en varios supuestos.
- Elección del acero laminado en frío por su ligereza, facilidad de fabricación y coste reducido.
- Utilización de 3 tipos de perfiles diferentes de acero laminado en frío (perfiles en L, perfiles en T y perfiles en aspa)
- Galvanización de los perfiles y elementos metálicos para protegerlos de la corrosión.
- Diseño de paneles de puerta, ventana, cerramiento, techo y suelo para su fabricación completa en fábrica y desplazamiento a la zona de obra.
- Diseño de uniones sencillas en seco, con agujeros rasgados para reducir la posibilidad de errores en la construcción.
- Empleo de perfiles metálicos a modo de tapajuntas en los encuentros entre paneles de cerramiento y cubiertas.
- Empleo de cruces de San Andrés para dotar de rigidez nuestras edificaciones.
- Coste del Diseño 1: 3201 €, Diseño 2: 19598,4€, Diseño 3: 31086€.
- El Diseño 3 es el que presenta el coste/m² más bajo de las 3 alternativas.
- Coste del envío de cada contenedor de 2230 euros.
- Tiempo de entrega desde que se recogen de fábrica hasta la ubicación final de 18 días.



13. Bibliografía:

Normativas:

- Instituto Americano de Hierro y Acero- Especificación de Diseño por Factor de Carga y Resistencia (AISI-LRFD96)
- Norma de Construcción Sismorresistente: Edificaciones(NCSP-02)
- Instrucción de Acero Estructural (EAE)
- Código Técnico de la Edificación (CTE)
- Norma UNE 17-108-81

Páginas web

- **Generador de precios (CYPE Ingenieros S.A)** ; <http://generadorprecios.cype.es/>
- **Instituto Valenciano de la Edificación (IVE)**; <https://www.five.es/>
- **Cuatro50**; http://www.cuatro50.com/nueva_cuatro50/cuatro50.html
- **Modultec**; http://www.modultec.es/uploads/files/construcciones_modulares_prefabricadas.pdf
- **Modular Projects**; <http://www.modularprojects.es>
- **ABS Passive**; <http://casaspasivas.abs.es/>
- **Grupo Alco**; <http://www.alcogrupos.es/index.php?v=modular>
- **Tectónica**; <http://www.tectonica-online.com>
- **CompactHabit**; <http://www.compacthabit.com/es/ventajas/>
- **OboxHousing**; <https://www.oboxhousing.com/sistema-obox/>
- **BSCP**; http://www.bscp.es/htdocs/bscp/que_es/p_industria.htm
- **Mimbrea**; <http://www.mimbrea.com/contruccion-con-contenedores-martimos/>
- **Ovacen**; <https://ovacen.com/la-arquitectura-con-contenedores-ventajas-y-desventajas/>
- **ContainerCity**; <http://www.containercity.com/>
- **Vilssa**; <http://vilssa.com/módulos-habitables-prefabricados>
- **The Luxury Spot**; <https://theluxuryspot.com/would-you-want-to-live-in-a-spacebox/>
- **20minutos**; <https://www.20minutos.es/noticia/1709370/0/nueva-york/diseño-primeras/microviviendas/>
- **TDX**; <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6162/04Xrr04de17.pdf>
- **Pacheco&asociados**; <https://www.spanisharchitect.info/2016/07/25/cu%C3%A1-es-el-tamaño-m%C3%ADNIMO-legal-de-una-vivienda-en-espa%C3%B1a-parte-1/>
- **EasyCargo**; <https://www.easycargo3d.com/es/>
- **Transporte.MX**; <https://www.transporte.mx/que-es-un-teu/>
- **Ministerio de Fomento**; <https://www.fomento.gob.es/transporte-terrestre/inspeccion-y-seguridad-en-el-transporte/pesos-y-dimensiones/pesos-maximos-exceso-de-peso-sanciones>



- **Paneles Ebro;** <https://panelesebro.com/chapa-grecada/>
- **Hierros Puig;** <http://www.ferrospuig.com/index.php/es>
- **Atlantida Homes;** <https://atlantidahomes.com/casas-prefabricadas-con-estructura-de-acero/>
- **MarineTraffic;** <https://www.marinetraffic.com>
- **Hapag-Lloyd;** <https://www.hapag-lloyd.com/es/products/fleet/container/40-standard-high-cube.html>
- **HamburgSudLine;**
https://www.hamburgsudline.com/liner/es/liner_services/index.html
- **Valencia Port;** <https://www.valenciaport.com/>

14. Anejos

La presente memoria se complementa con los anejos siguientes. En cada uno de estos anejos se pueden consultar con detalle toda la información necesaria para la comprensión de la memoria.

ANEJO N°1: Dimensiones y características del módulo prefabricado

ANEJO N°2: Cálculo estructural

ANEJO N°3: Diseño de Uniones

ANEJO N°4: Diseño final

ANEJO N°5: Logística y transporte

ANEJO N°6: Valoración económica

Valencia, junio de 2019

El autor del Trabajo de Final de Grado

Serrano Richart, Luis